

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Justinas GARGASAS

ELEKTROLANKINIŲ PURŠKIMU SUDAROMŲ METALINIŲ DANGŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2015

Disertacija rengta 2011–2015 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Algirdas Vaclovas VALIULIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Donatas Jonas SIDARAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

dr. Valentin ANTONOVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

dr. Martynas AUDRONIS (Šefildo universitetas, Jungtinė Karalystė, medžiagų inžinerija – 08T),

prof. dr. Mindaugas JUREVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),

dr. Rimantas LEVINSKAS (Lietuvos energetikos institutas, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2016 m. sausio 15 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2015 m. gruodžio 14 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2356-M mokslo literatūros knyga
ISBN 978-609-457-871-7

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2015

© Justinas Gargasas, 2015

Justinas.gargasas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Justinas GARGASAS

THE INVESTIGATION OF METALLIC COATINGS MADE BY ARC SPRAY

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2015

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2015.

Scientific supervisor

Prof. Dr Habil. Algirdas Vaclovas VALIULIS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Donatas Jonas SIDARAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Members:

Dr Valentin ANTONOVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),

Dr Martynas AUDRONIS (Sheffield University, United Kingdom, Materials Engineering – 08T),

Prof. Dr Mindaugas JUREVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T),

Dr Rimantas LEVINSKAS (Lithuania Energy Institute, Materials Engineering – 08T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 15 January 2016**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 14 December 2015.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama elektrolankiniam terminiam purškimui sukurtos naujos miltelinės vielos bei jomis užpurkštų dangų savybės. Pagrindinis tyrimo objektas yra sukurtos naujos elektrolankiniam purškimui skirtos medžiagos ir jų pagrindu užpurkštos Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr-Mo ir Fe-Mn-Cr sistemų lydinų dangos. Sukurtų terminiam purškimui miltelinių vielų taikymo sritis yra restauruojamos arba gaminamos naujos dalys, naudojamos įvairiose pramonės ir žemės ūkio šakose. Disertacijoje siekiama parinkti optimalų technologinį purškimo procesą ir taip gauti dangas, pasižyminčias geriausiomis mechaninėmis, fizikinėmis, tribologinėmis ir antikorozinėmis savybėmis pritaikytomis konkrečioms eksploatacinėms sąlygoms.

Darbe sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: purškimo fakelo dalelių įtaka dangų morfologijai, cheminės sudėties ir technologinių parametrų įtaka dangų mechaninėms savybėms, korozinis bei trinties atsparumas įvairiomis sąlygomis. Elektrolankinio purškimo srovės keitimas leido indentifikuoti dalelių granulometrijos ir dangų morfologijos įtaką mechaninėms ir tribologinėms savybėms. Darbe taikyti eksperimentiniai tyrimo metodai, leido įvertinti dangų kokybines charakteristikas.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir trys priedai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, gėnamiėji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra. Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame apžvelgti darbai, kuriuose nagrinėjami skirtingi purškimo būdai, plieno paviršiaus stiprinimo metodai, substrato paruošimas prieš purškimą, dangų struktūros ir savybės, vielų kūrimo principai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikiamos tyrime naudotos medžiagos ir įrenginiai, darbe taikomi medžiagų ir jų savybių tyrimo metodai. Trečiajame skyriuje pateikiami ir analizuojami surinktų fakelo dalelių dydžiai, užpurkštų dangų mikrostruktūros sandaros ypatumai, mechaninės dangų savybės, jų atsparumas šlapiajai, sausajai ir slydimo trinčiai bei dangų atsparumo korozijai tyrimų rezultatai.

Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai, o tyrimų rezultatai pristatyti 13 mokslinių pranešimų Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

The dissertation investigates the created new flux-cored wires for thermal arc spraying and the properties of coatings sprayed by them. The main object of research is the new materials created for thermal arc spraying and the Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr system alloy coatings sprayed on the basis of these materials. The application area of new flux-cored wires created for thermal arc spraying is restaured or produced new parts which are used in various fields of industry and agriculture. This dissertation aims at choosing the optimal technological spraying process and thus getting the coatings with the best mechanical, physical, tribological and anticorrosive properties, suitable for real exploitation conditions. The paper approaches these main tasks: influence of molten flare particles on coatings' morphology, influence of chemical composition and technological parameters on mechanical properties of coatings, corrosive and friction resistance under various conditions. Changing of thermal arc spraying current allowed to identify influence of particles granulometry and coatings morphology on mechanical and tribological properties. The experimental methods of analysis applied in work allowed to evaluate the qualitative characteristics of coatings.

The dissertation consists of introduction, 3 chapters, general conclusions, references, list of scientific publications by the author on the topic of the dissertation, and 3 annexes. The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis, and the object of research, and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation. Chapter 1 revises used literature. It reviews the papers dealing with different spray techniques, the steel surface enhancement methods of substrate preparation prior to spraying, the properties of coatings and development of wire creation. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered. Chapter 2 presents the materials and equipment used in research, the methodology of material and their properties' analysis applied in this work. In Chapter 3 the size of collected flare particles, specific features of sprayed coatings microstructure, mechanical properties of coatings, the resistance of coatings to wet, dry and sliding friction and the results of analysis of corrosive resistance of coatings are presented and analysed.

The materials of the dissertation were published in 7 scientific articles and the results of the research were presented at 13 scientific conferences in Lithuania and aboard.

Žymėjimai

Simboliai

HK – kietis pagal Knopą;

HV – kietis pagal Vikersą;

HV 0,1 – kietis pagal Vikersą, esant 100 g apkrovai ir 10 s išlaikymui, HV;

HV 0,3 – kietis pagal Vikersą, esant 300 g apkrovai ir 10 s išlaikymui, HV;

σ – standartinis nuokrypis;

σ_c – kritinė irimo deformacija;

α – kritinis plyšio dydis;

a – didžioji įspaudo rombo įstrižainė, μm ;

b – mažoji įspaudo rombo įstrižainė, μm ;

a'; b' – didžiosios ir mažosios indentoriaus įstrižainių ilgiai, μm ;

α – konstanta;

E – tamprumo modulis, Pa;

\bar{x} – imties vidurkis;

n – imties dydis;

R_h – dangų stipris;

F – bandymo metu užfiksuota maksimali jėga;

S – bandomojo paviršiaus plotas;

Ra – paviršiaus šiurkščio parametras, vidutinis aritmetinis profilio nukrypimas;

T – temperatūra, °C.

Santrumpos

APS – atmosferinis plazminis purškimas;

CGSM – šaltasis dujinis purškimo metodas;

D-gun – detonacinis purškimas;

EB – PVD – fizinis garų nusodinimo būdas veikiant elektronų pluošto spinduliuotei;

H – heksagoninė gardelė.

HVAF – didelio greičio oro dujų purškimas;

HVOF – didelio greičio deguonies liepsninis purškimas;

KCI – kubinė centruoto tūrio gardelė;

KCP – kubinė centruoto paviršiaus gardelė;

LPPS – mažaslėgis plazminis purškimas;

POD – trinties bandymas su besisukančiu disku su danga ir kietu indentoriumi;

RMA – rentgeno mikroanalizė;

SEM – nuskaitančioji elektroninė mikroskopija (angl. *scanning electron microscopy*);

VPS – vakuuminis plazminis purškimas;

WS – šiltasis purškimas;

XRD – rentgeno spindulių difrakcija (angl. *X-ray diffraction*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	2
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
 1. TERMINIO PURŠKIMO PROCESO IR DANGŲ FORMAVIMOSI YPATUMŲ ANALIZĖ.....	 7
1.1. Terminis purškimas	7
1.2. Terminiu būdu užpurkštų dangų formavimasis ir jų savybės	15
1.3. Dengiamojo substrato paviršiaus valymas	19
1.4. Miltelinių vielų ir užpildo gamybos technologijos	21
1.5. Miltelinių vielų kūrimo principai	24
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	26

2. ELEKTROLANKINIO PURŠKIMO DANGŲ GAVIMO METODIKA, DARBE TAIKOMI TYRIMO METODAI IR MEDŽIAGOS	29
2.1. Medžiagų kūrimas	30
2.2. Purškimo įranga ir purškimo parametrai	32
2.3. Eksperimentinio tyrimo metodika	34
2.3.1. Substrato paruošimas	34
2.3.2. Optinė mikroskopija.....	35
2.3.3. Nuskaitančioji elektroninė mikroskopija	35
2.3.4. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė	35
2.3.5. Išlydytų fakelo dalelių analizė	36
2.3.6. Mikroketumo ir dangos tamprumo modulio matavimai	36
2.3.7. Dangų adhezijos tyrimai	38
2.3.8. Dangų paviršiaus šiurkščio matavimas	39
2.3.9. Porėtumo ir oksidų kiekio nustatymas	39
2.3.10. Dangų tribologiniai tyrimai ir paviršinė dangų 3D profilometrija	39
2.3.11. Dangų korozinio atsparumo tyrimai.....	43
2.4. Antrojo skyriaus išvados	43
3. ELEKTROLANKINIŲ BŪDŲ UŽPURKŠTŲ DANGŲ SAVYBIŲ TYRIMAI IR ANALIZĖ.....	45
3.1. Surinktų fakelo dalelių analizė	45
3.2. Dangų sandaros tyrimai	48
3.3. Dangų adhezijos tyrimai.....	63
3.4. Dangų porėtumo ir oksidų procentinio kiekio nustatymas dangose	65
3.5. Dangų korozinio atsparumo rezultatai.....	69
3.6. Dangų šiurkščio matavimai	72
3.7. Dangų mikroketumo ir tamprumo modulio nustatymas	74
3.8. Dangų dilimo rezultatai	78
3.8.1. Sausosios trinties rezultatai.....	78
3.8.2. Šlapiosios trinties bandymų rezultatai	80
3.8.3. Slydimo trinties ir 3D profilometrijos rezultatai	81
3.9. Trečiojo skyriaus išvados	87
BENDROSIOS IŠVADOS	91
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	93
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	99
SUMMARY IN ENGLISH.....	101

PRIEDAI ¹	119
A priedas. Skaitinės adhezijos reikšmės	120
B priedas. Bendraautoriių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	122
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	130

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	2
The relevance of the thesis	2
The object of research	2
The aim of the work	3
The objectives of the work	3
Research methodology	3
The scientific novelty of the thesis.....	4
The practical value of the research findings	4
The defended statments	5
The approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	6
 1. THE ANALYSIS OF THE THERMAL SPRAYING PROCESS AND THE FEATURES OF FORMING COATINGS	 7
1.1. The thermal spraying.....	7
1.2. The coatings formation and their properties of thermal spray	15
1.3. The substrate surface cleaning	19
1.4. The filler production technology of cored wires	21
1.5. The creation principles of cored wires	24
1.6. The conclusions of the first chapter and formulation of the objectives of dissertation	 26

2. THE METHODOLOGY OF THE THERMAL ARC SPRAYING COATINGS, RESEARCH METHODS AND MATERIALS USED IN WORK.	29
2.1. The creation of materials.....	30
2.2. The equipment and parameters of spraying.....	32
2.3. The research of experimental methodology	34
2.3.1. The preparation of substrate.....	34
2.3.2. Optical Microscopy.....	35
2.3.3. Scanning electron microscopy analysis	35
2.3.4. X-ray diffraction analysis	35
2.3.5. The analysis of molten flare particles	36
2.3.6. The micro hardness and elastic modulus measurements of the coatings	36
2.3.7. Coating adhesion measurements.....	38
2.3.8. Roughness measurements	39
2.3.9. Porosity and oxide evaluation	39
2.3.10. The research of tribological coatings properties and surface 3D profilometry	39
2.3.11. Corrosion-resistance tests.....	43
2.4. The conclusions of the second chapter	43
3. THE INVESTIGATION AND ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF THE THERMAL ARC SPRAYED COATINGS	45
3.1. The collected flare particle analysis	45
3.2. The structure analysis.....	48
3.3. Coating adhesion analysis.....	63
3.4. The porosity and oxide percent evaluation in the coatings.....	65
3.5. The results of coatings corrosion - resistance.....	69
3.6. Coating roughness measurements	72
3.7. The micro hardness and modulus of elasticity evaluation in the coatings.....	74
3.8. The results of wear resistance	78
3.8.1. The results of dry friction.....	78
3.8.2. The results of wet friction	80
3.8.3. The results of sliding friction and 3D profilometry.....	81
3.9. The conclusions of the third chapter	87
GENERAL CONCLUSIONS	91
REFERENCES	93
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE SUBJECT OF THE DISSERTATION	99
SUMMARY IN ENGLISH.....	101

ANNEXES ¹	119
Annex A. The values of adhesion	120
Annex B. The co-authors agreements for providing the materials of the joint publications in the doctoral dissertation	122
Annex C. Copies of the scientific publications by the author on the subject of the dissertation	130

¹ The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Įvadas

Problemos formulavimas

Šiuo metu žinoma daugybė būdų, kaip pagerinti eksploatacinių paviršių, kuriuos veikia agresyvi terpė kokybę. Atskirą grupę sudaro terminio purškimo technologijos. Pramonėje taikomų terminio purškimo procesų ir medžiagų įvairovė leidžia gauti dangas, geriausiai tinkančias konkrečioms gaminio eksploatacinėms sąlygoms. Kiekviena purškiamų medžiagų grupė turi konkrečią taikymo sritį, todėl dangos turi pasižymėti tam tikra struktūra ir savybėmis, kad maksimaliai atitiktų eksploatacinius reikalavimus.

Sukurtos naujos medžiagos turi būti ištirtos, siekiant išsiaiškinti jų tinkamumą. Paviršinių dangų eksploatacinės savybės labai priklauso nuo dangos struktūros ir jose esančių vidinių defektų. Terminio purškimo dangos formavimąsi lemia įvairūs faktoriai, kurių visuma yra svarbi siekiant optimalių dangos savybių. Nepakankamai ištirtas elektrolankinio purškimo medžiagų cheminės sudėties, purškimo technologijos ir gaunamos dangos savybių suderinamumas neleidžia prognozuoti gaunamų paviršių optimalių savybių.

Darbo aktualumas

Pastaruoju metu visame pasaulyje atliekama daug tyrimų su terminio purškimo dangomis ir naujų purškimo medžiagų paieška. Šiame darbe siekiama ištirti sukurtų naujų elektrolankiniam purškimui skirtų vielų tinkamumą metalinių paviršių dengimui, įvertinant dangų mechanines, tribologines ir korozines savybes, pakeičiant šiuo metu pramonėje naudojamas purškimo medžiagas. Šiuolaikinės paviršiaus gerinimo technologijos leidžia pakeisti brangius ir retus metalus kur kas pigesniais, nesumažinant ar net pagerinant konstrukcijos patikimumą ir ilgaamžiškumą. Taip taupomos gamybos išlaidos ir tausojami gamtos ištekliai. Specialiomis savybėmis pasižyminčioms dangoms pirmiausia reikia sukurti naujas purškimo medžiagas, kurios fizikiniais, ekonominiais ir technologiniais rodikliais būtų konkurencingos jau naudojamoms medžiagoms.

Dangų eksploatacinės savybės labai priklauso nuo purškiamos medžiagos, purškimo technologijos, medžiagos išsilydymo temperatūros, išlydytų dalelių dydžio ir formos. Užpurkštai dangos struktūrai įtakos turi ne tik cheminė purškiamos medžiagos sudėtis, bet ir purškimo proceso parametrai. Elektrolankiniu terminiu purškimu siekiama sukurti dangas, kurios pasižymėtų dideliu stipriu, kietumu, atsparumu dilimui, tačiau būtų plastiškos ir neprarastų savo savybių jas deformuojant. Šiam tikslui pasiekti kuriamos įvairių sudėčių medžiagos, kurios lydymo metu sudaro metališkuosius, karbidinius ir kitokius junginius, suteikiančius dangai reikalingų savybių, kuomet po purškimo nereikia terminio apdorojimo.

Disertacijoje pristatomi atlikti tyrimai su naujomis purškimo vielomis, apimantys daugiakriterį vertinimą, siekiant išsiaiškinti technologinio purškimo proceso ypatumus, kuriant optimalių fizinių, morfologinių, tribologinių ir antikoroziinių savybių paviršius, plačiai taikomus pramoninėje gamyboje.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – sukurtos naujos elektrolankiniam purškimui skirtos medžiagos (miltelinės vielos) ir jų pagrindu keičiant technologinius purškimo parametrus užpurkštos Fe pagrindo Mn-Cr-Mo-Ni, Mn-Cr-Mo ir Mn-Cr sistemų lydinų dangos.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti elektrolankiniam terminiam purškimui tinkamas geležies pagrindo miltelines vielas, legiruotas Mn-Cr-Mo-Ni, Mn-Cr-Mo, Mn-Cr

sistemų legiruojančiaisiais elementais, pasižyminčias išskirtinėmis dangų eksploatacinėmis savybėmis, taip pat nustatyti pagrindinių technologinių purškimo parametrų sąsajas su formuojamų dangų savybėmis.

Darbo uždaviniai

Norint pasiekti darbo tikslą reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Sukurti naujos cheminės sudėties miltelines vielas, kurios pasižymėtų tinkamumu purškimo procesui ir galėtų pakeisti šiuo metų rinkoje esančias ekonomiškai nerentabilias vielas, skirtas plienų paviršiui stiprinti ar restauruoti.
2. Nustatyti purškiamų fakelo dalelių įtaką dangų morfologijai.
3. Nustatyti dangų cheminės sudėties ir technologinių parametrų įtaką mechaninėms savybėms.
4. Nustatyti dangų technologinių parametrų, morfologijos, cheminės sudėties įtaką koroziniam atsparumui.
5. Ištirti dangų atsparumą esant sausosios, šlapiosios ir slydimo trinties sąlygoms.

Tyrimų metodika

Disertaciniame darbe taikyti eksperimentiniai tyrimo metodai, leidžiantys įvertinti elektrolankinio terminio purškimo būdu gautų dangų kokybines charakteristikas. Darbe buvo tiriamos eksperimentinės elektrolankinio purškimo vielos, sukurtos bendradarbiaujant su Vokietijos koncerno „Drahtzug Stein“ technologais, užpurkštos dangos, taikant elektrolankinio purškimo technologiją. Dangų užpurškimas atliktas dviejose mokslinėse laboratorijose – Vilniaus Gedimino technikos ir Prancūzijos Belforo-Monbeljaro technologijos universitetuose. Vokietijos Chemnico technikos universiteto medžiagų ir paviršių inžinerijos mokslinėse laboratorijose atlikti tribologiniai dangų tyrimai bei dangų paviršiaus 3D profilometrija. Tribologinės dangų savybės įvertintos laikantis ASTM G65-04, ASTM G75-07 standartų reikalavimų. Dangų korozijos savybės tirtos atliekant dinامينius potenciometrinius korozijos bandymus Ukrainos Lvovo technikos universitete. Vilniaus Gedimino technikos universitete atlikti struktūriniai dangų tyrimai, porų ir oksidų kiekio dangoje vertinimas, dangų kietumo ir tamprumo modulio nustatymas, dangų adhezijos su substratu matavimai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurtos skirtingos cheminės sudėties miltelinės elektrolankinio terminio purškimo vielos, tinkamos plieniniams paviršiams stiprinti ar restauruoti.
2. Iširtos Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr-Mo ir Fe-Mn-Cr legiruotų dangų mechaninės, tribologinės ir adhezinės savybės.
3. Nustatytos dangų mikrostruktūros, adhezijos, mechaninių, antikoroziinių ir tribologinių savybių sąsajos su purškimo parametrais, kuriuos keičiant galima būtų optimaliai prisitaikyti prie konkrečių eksploatacinių sąlygų.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Pasiūlytos keturios naujos miltelinės elektrolankinio purškimo vielos, kurių sudėtyje esantys legiruojantieji elementai dangoje suformuoja chromo ir mangano karbidus, didinančius gaminio (detalės) paviršiaus atsparumą abrazyvinei trinčiai. Naujos purškimo vielos gali būti naudojamos pramonėje ir efektyviai pakeisti šiuo metu naudojamas brangesnes purškimo medžiagas.

Tyrimų rezultatai gali būti naudojami nustatant elektrolankinio purškimo technologinių parametrų įtaką gautų dangų mechaninėms, fizinėms ir tribologinėms savybėms, kaip, tikslinant purškimo parametrus, galima gauti dangas, geriausiai tinkančias konkrečioms eksploatacinėms sąlygoms.

Ginamieji teiginiai

1. Purškimo srovė turi įtakos išlydytų fakelo dalelių dydžiui ir šiuo technologiniu parametru efektyviai veikiama užpurkštų dangų morfologija, nuo kurios priklauso jų kokybinės charakteristikos.
2. Užpurkštų dangų kietumą, korozines, tribologines savybes esant šlapiajai, sausajai ir slydimo trinčiai lemia susidarantys $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$, Cr_7C_3 ir Mn_7C_3 karbidai.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema išspausdinti septyni moksliniai straipsniai: keturi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į tarptautines duomenų bazines; vienas – kituose recenzuojamuose periodiniuose leidiniuose, vienas – konferencijų pranešimų medžiagoje, vienas – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje. Taip pat dar vienas straipsnis yra priimtas spaudai mokslo žurnale, įtrauktime į „ISI Web of Science“ sąrašą.

Visų straipsnių bendraautoriams priklauso po lygią tame straipsnyje paskelbtų tyrimų rezultatų dalį.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti trylikoje mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje:

- jaunųjų mokslininkų konferencijose „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2011–2015 m. Vilniuje;
- tarptautinėje konferencijoje „*The 4th World Conference on Technology and engineering Education*“ 2015 m. Slovakijoje;
- tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials*“ 2013 m. Vilniuje;
- tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials*“ 2015 m. Kaune;
- tarptautinėje konferencijoje „*International Thermal Spray Conference and Exposition, ITSC 2014*“ 2014 m. Barselonoje;
- respublikinėje konferencijoje „*Medžiagų inžinerija*“ 2014 m. Kaune;
- respublikinėje konferencijoje „*Medžiagų inžinerija*“ 2013 m. Kaune;
- tarptautinėje konferencijoje „*Advanced Materials and Technologies*“ 2013 m. Palangoje;
- jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Werkstoffe und werkstofftechnische anwendungen Kolloquium*“ 2013 m. Vokietijoje, Chemnice.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra 3 priedai. Darbo apimtis yra 117 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 5 numeruotos formulės, 58 paveikslai ir 16 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 100 literatūros šaltinių.

Terminio purškimo proceso ir dangų formavimo ypatumų analizė

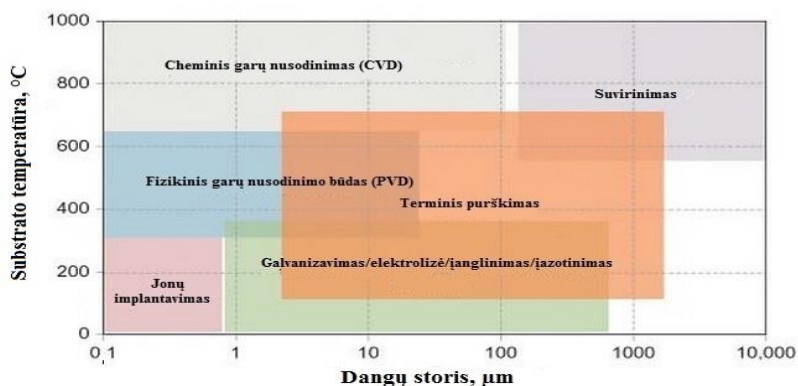
Skyriuje analizuojami terminio purškimo būdai bei dangų formavimosi proceso dėsningumai ir ypatumai. Nagrinėjamos miltelinių vielų ir užpildų gamybos technologijos bei poreikis kurti naujas purškimo medžiagas ir jas ištirti.

Skyriaus tematika paskelbti 3 autoriaus straipsniai (Gargasas *et al.* 2011; Gargasas *et al.* 2013a; Gargasas *et al.* 2014a).

1.1. Terminis purškimas

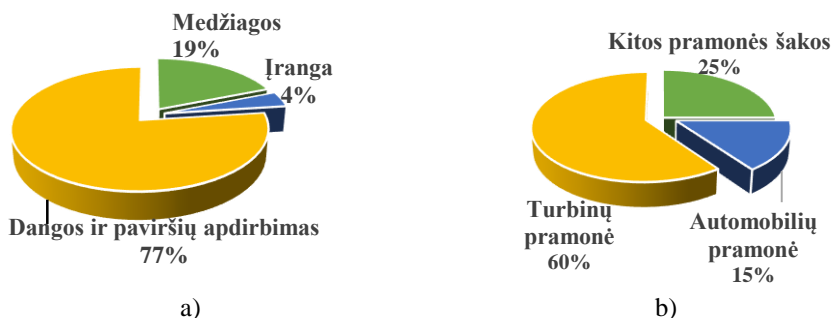
Vienas iš pagrindinių medžiagų inžinerijos tikslų – patobulinti jau naudojamus procesus ir medžiagas, padidinti jų ilgaamžiškumą, atrasti naujus reiškinius, sukurti gerų eksploatacinių savybių mašinas ir konstrukcijas, sumažinti jų gamybos, medžiagų ir energijos sąnaudas, įdiegti efektyvius technologinius procesus ir medžiagas, surasti optimalius kuriamų medžiagų pritaikymo būdus. Populiariausias pramonėje šio uždavinio sprendimo būdas – tai gaminio paviršinio sluoksnio su optimaliomis eksploatacinėmis savybėmis sukūrimas (Pierre *et al.* 2014; Minisandram *et al.* 2002; Greving *et al.* 1994). Tarp įvairių paviršiaus gerinimo būdų

įvairios dangos tiriamos ir taikomos plačiausiai. 1.1 paveiksle pateiktas skirtingais būdais padengtų paviršių dangų storio ir substrato temperatūros palyginimas. Dangų storis varijuoja nuo kelių mikronų ir gali siekti daugiau nei 1000 μm . Kaip matyti iš paveikslo, terminio purškimo technologijomis užpurkštos dangos užima plačią sritį. Bene pagrindinis šio proceso pranašumas lyginant su kitais dangų dengimo būdais yra našumas, kadangi galime nuo keleto iki keliolikos kartų padengti daugiau dangos nei kitais būdais. Didelis dangų storio intervalas terminio purškimo dangas leidžia plačiai taikyti įvairiose pramonės šakose.



1.1 pav. Skirtingų dangų, naudojamų pramonėje, palyginimas (Davis 2004)
Fig. 1.1. Comparison of the different coating processes in the market (Davis 2004)

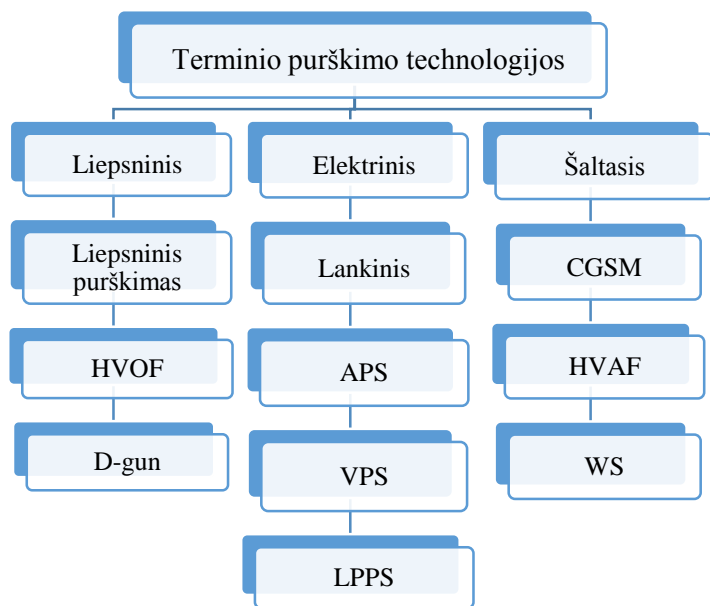
Pasak *Dorfman ir Sharma* (2013), pasaulinė terminio purškimo pramonė kasmet auga ir 2013 metais įvertinta 6,5 mlrd. JAV dolerių. 1.2 a paveiksle pateiktas termininiame purškime generuojamų pajamų pasiskirstymas. 1.2 b paveiksle nurodomos pramonės šakos, taikančios terminį purškimą: 60 % turbinų paviršių gamyba ir atstatymas, 15 % automobilių pramonė, 25 % kitos pramonės sritys.



1.2 pav. Pasaulinė terminio purškimo pramonė: a) generuojamų pajamų pasiskirstymas; b) pritaikomumas pramonės srityse (*Dorfman et al.* 2013)

Fig. 1.2. The global industry of thermal spray: a) distribution of revenue generation in coating services; b) market segmentation in thermal spray industry (*Dorfman et al.* 2013)

Terminio purškimo būdai grupuojami pagal naudojamos energijos rūšį. Klasifikacija pateikiama 1.3 paveiksle. Visi terminio purškimo būdai plačiai taikomi įvairiose pramonės srityse ir yra labai svarbūs gaminant naujas detales ar restauruojant senas detales ar atskirus mazgus (Rico *et al.* 2009).



1.3 pav. Terminio purškimo klasifikacija: HVOF – didelio greičio deguonies liepsninis purškimas; D-gun – detonacinis; APS – atmosferinis plazminis purškimas; VPS – vakuuminis plazminis purškimas; LPPS – mažaslėgis plazminis purškimas; CGSM – šaltasis dujinis purškimo metodas; HVAF – didelio greičio oro dujų purškimas ir WS – šiltasis purškimas (Espallargas 2015)

Fig. 1.3. Clasification of thermal spray technology: HVOF – High – velocity oxygen fuel, D-gun – (detonation gun), APS – atmospheric plasma spray, VPS – vacuum plasma spray, LPPS – low pressure plasma spray, CGSM – cold gas spraying method, HVAF – high – velocity air fuel and WS – warm spray (Espallargas 2015)

Šiuo metu plačiausiai naudojami šie terminio purškimo būdai:

- liepsninis purškimas;
- elektrolankinis purškimas;
- plazminis purškimas (APS);
- detonacinis purškimas;
- didelio greičio deguonies liepsninis purškimas (HVOF);
- šaltasis purškimas.

Terminis purškimas – labai universali paviršiaus dengimo technologija, dažniausiai apipurškiamasis paviršius būna metalinis, tačiau dažnai pasitaiko ir tokių atvejų, kad substratas būna pagamintas iš kompozicinių medžiagų, keramikos, plastiko, stiklo ar net medžio. Visa tai priklauso nuo terminio purškimo būdo, parinktos technologijos (1.1 lentelė), užpurškiamos medžiagos išsilydymo laipsnio ar elektrolankinės vielos šilumos laidumo, išsilydžiusių dalelių formos (Fang *et al.* 2005). Substratus galima dengti metalu, įvairiais lydiniais ar keramika.

1.1 lentelė. Terminio purškimo būdų palyginimas

Table 1.1. Thermal spray techniques comparison

Parametrai/ savybės	Lieps- ninis purški- mas	Elekt- rolankinis purški- mas	Detona- cinis purškimas	HVOF	APS	Šaltasis purški- mas
Tem- peratūra, °C	3500	>6000	>4000	2500– 3000	10000– 15000	0–700 (paka- itinus)
Dujų srauto greitis, m/s	80–100	50–100	>2500	500– 2000	300– 1000	300– 1200
Dujos	O ₂ / C ₂ H ₂ , C ₃ H ₈ , H ₂	Oras, N, Ar	O ₂ / C ₂ H ₂ , H ₂ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀	O ₂ / C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈ , O ₂	Ar, He, H ₂	N, He, oras
Galia, kW	20	5–10	-	150–300	40–200	-
Max temp. purškimo metu, °C	2500	>3800	-	3300	>3800	250
Dalelių skriejimo greitis, m/s	50–100	50–150	750-1000	200– 1000	50–100	500
Dangos porėtumas, %	10–15	1–20	<2	<2	5–10	<5
Adheziija	Žema	Aukšta	Ypač aukšta	Aukšta	Labai aukšta	Aukšta
Storis, μm	100– 2500	100–2000	100–400	50–2000	100– 1500	250–600

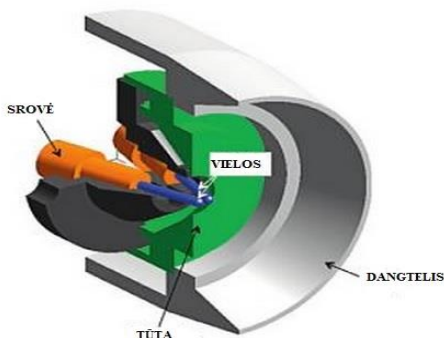
Liepsninis purškimas – vienas iš paprasčiausių ir dažniausiai naudojamų terminio purškimo būdų. Šio purškimo metu viela ar milteliai išlydomi degant degiosioms dujoms (acetilenui, gamtinėms dujoms ir kt.) su deguonimi (Bradai *et al.* 2008). Išlydyto metalo lašeliai ant gaminio paviršiaus išpurškiami suslėgto oro arba inertinių dujų srautu. Dujinių purškimu formuojamų dangų medžiagos lydosi žemesnėje lydymosi temperatūroje nei fakelo liepsnos temperatūra. Dujiniam purškimui dažniausiai naudojami acetileno, propano ir butano mišiniai. Degant dujoms, išsiskiria šiluma, kuri sunaudojama purškamajai medžiagai įkaitinti ir išlydyti, o susidariusi kinetinė dujų srauto energija mechaniškai susmulkina jos daleles. Dujų liepsnos sraute įgreitėjusios dalelės bombarduoja gaminio paviršių ir mechaniškai prilimpa. Smūgio metu dalis kinetinės energijos virsta šiluma bei įvyksta susmulkintos medžiagos agregatiniai ir faziniai virsmai.

Liepsninio purškimo pranašumai: palyginti su kitais purškimo būdais, tai yra pats paprasčiausias, ekonomiškasis ir lengvai automatizuojamas procesas, nesudėtinga aparatūra, galima purkšti net nesant elektros srovės, užpurškimo procesas netriukšmingas. Purškimo atstumas varijuoja nuo 120 iki 250 mm, purškiama oro aplinkoje, dengiamojo substrato paviršius įkaista iki 250 °C temperatūros (Espallargas 2015). Dėl šių pranašumų dujinis terminis purškimas plačiai taikomas gamyboje. Tačiau jis turi ir trūkumų: negalima purkšti keraminių medžiagų (per daug žema liepsnos temperatūra), dangoje yra oksidų, ji būna netanki ir ne visada gerai sukimba su gaminiu. Norint padidinti dangos tankį ir sumažinti poringumą, po dujinio purškimo ji perlydoma. Tam tikslui, užpurškus reikiamo storio dangą, miltelių ar vielos tiekimas nutraukiamas ir paviršius kaitinamas to paties degiklio liepsna. Perlydymo metu neturi pradėti lydytis pagrindinis metalas.

Gaunamų dangų eksploatacinės savybės labai priklauso nuo dangos struktūros ir lamelių išsidėstymo bei vidinių defektų, tokių kaip poros ir oksidai (Redjda *et al.* 2013).

Elektrolankinis terminis purškimas – vienas iš dažniausiai ir plačiausiai naudojamų terminio purškimo būdų. Šio purškimo metu užpurškamajam metalui išlydyti naudojama elektros lanko šiluma. Purškimo įrenginio išpurškimo tūtoje tarp elektrodų sukuriamas tam tikra įtampa, susidaro elektros lankas, kurio veikiamos elektrolankinio purškimo vielos lydosi, lankas dega tarp dviejų nepertraukiamai tiekiamų vielinių elektrodų. Išsiskiria šiluma, kuri juos įkaitina ir išlydo 1.4 pav. Išlydytos vielinių elektrodų dalelės suslėgtu oru (ar dujomis) užpurškiamos ant substrato. Purškimo fakelo charakteristikos ir purškimo kokybiniai bei kiekybiniai parametrai labai priklauso nuo tūtos geometrinės formos, keičiant fakelę lekiančių dalelių greitį, temperatūrą ir tūtos angos skersmenį galima optimizuoti purškimo parametrus ir gauti geresnę adheziją su substratu (Gedzevičius *et al.* 2003; Newbery *et al.* 2000).

Norint sumažinti oksidaciją purškimo metu vietoj oro naudojamas azotas arba argonas, tačiau tai labai padidina purškimo savikainą. Tiekiamų dujų debitas dažniausiai būna ne mažesnis nei 4,5–6,5 MPa (Chen *et al.* 2015). Degančio lanko temperatūra priklauso nuo tiekiamų dujų, vielos cheminės sudėties, purškimo režimų. Dalelių judėjimo greitis būna apie 180 m/s, todėl jos lengvai prisivirina prie gaminio. Naudojama nuolatinė elektros srovė, nes, lyginant su kintamąja srove, procesas vyksta stabiliau, todėl danga būna smulkiagrūdės struktūros (Jandin *et al.* 2003; Cheng *et al.* 2001; Kelkar *et al.* 1998). Lankiniu būdu dažniausiai užpurškiamos metalinės dangos ant didelių paviršių. Šis purškimo būdas naudojamas dėl greito ir kokybiško paviršiaus padengimo (Yazid *et al.* 2014). Elektrolankinis terminis purškimas tinka plienų paviršiui sustiprinti bei antikorozinėms cinko, aliuminio, chromo ar molibdeno dangoms sudaryti. Užpurškiamos dangos greitai storėja dėl didelio skysto metalo pernešimo. Lanko temperatūra būna iki 6000 °C. 1.1 lentelėje pateikta informacija apie terminio purškimo būdų palyginimą (Espallargas 2015).



1.4 pav. Elektrolankinio terminio purškimo pistoleto struktūrinė schema (Bolot *et al.* 2008)

Fig. 1.4. Schematic of the wire – arc spray device (Bolot *et al.* 2008)

Išskiriami keli pagrindiniai elektrolankinio terminio purškimo pranašumai: tai labai našus procesas, kurio metu galima užpurkšti didelius plotus per trumpą laiko tarpą (Chen *et al.* 2009). Eksploatacijos išlaidos nedidelės, dangos būna stipresnės ir geriau sukibusios už dujiniu būdu užpurkštas dangas, nes purškimo metu dalelės įkaista iki aukštesnės temperatūros ir susidūrusios su gaminiu geriau prisivirina. Naudojant skirtingos sudėties vielas, galima gauti kompozicines pseudo-dangas. Purškimo procesą lengva robotizuoti, įrangos kaina nedidelė.

Pagrindiniai elektrolankinio terminio purškimo trūkumai: galima purkšti tik elektrai laidžias medžiagas; purškimo metu išdega dalis elektrodų vieloje esančių legiruojančiųjų elementų (pvz.: anglies kiekis dangoje sumažėja 40–50 %, o silicio ir mangano 10–15 %); medžiagą išpurškiant ir pernešant suslėgto oro srautu,

išlydytos dalelės sąveikauja su jame esančiu deguonimi ir azotu, todėl susidaro oksidai ir nitridai, kurie patenka į užpurškiamąją dangą, taip susilpnindami mechanines dangų savybes. Purškiamoji medžiaga gali lengvai perkaisti, jei elektrodinės vielos tiekimo greitis yra mažas, o purškimo srovės didelės, taip dangą lengvai oksiduojasi. Dangos pasižymi vidutiniu poringumu.

Plazminio purškimo metu tarp nelydaus katodo ir aušinamos purškimo tūtos, atliekančios anodo funkciją, degantis elektros lankas įkaitina į tūtos vidų patekusias dujas su milteliais, kurios vėliau išlydytos plazmos srautu bloškiamos link substrato. Šio purškimo metu labai svarbu užtikrinti sužadintos plazmos stabilizuotumą, o plazmotrono angoje susidariusį slėgį išlaikyti vienodą (Fang *et al.* 2002). Tokioje stabilizuotoje plazmos srityje, kurioje susidaro lankinis išlydis, vadinamas plazmos branduoliu (Branland *et al.* 2006; Krenevičius 2007). Plazmos branduolio temperatūra siekia iki 15000 °C. Plazmotrono sienelės dažniausiai vėsinamos vandeniu, todėl plazmos temperatūrai artėjant prie sienelių ji sparčiai mažėja. Kintant temperatūrai, keičiasi jonizuotųjų dujų energija ir laidumas. Šie plazmos parametrai mažėja, žemėjant temperatūrai. Dėl didelio temperatūrų skirtumo tarp anodo sienelių ir plazmos branduolio centro jonizuotosios dujos yra smarkiai suslegiamos, todėl iš plazmotrono angos išėjusios plazmos greitis priklauso nuo plazmotrono konstrukcijos, dujų rūšies, elektros lanko išlydžio galios. Kadangi plazmotrono angos centre lankinio išlydžio metu susidariusios plazmos jonizacijos laipsnis didesnis nei šalia sienelių, papildomai susidaro magnetinis laukas, kuris dar padidina plazmos branduolio slėgį. Dažniausiai plazminiam purškimui naudojamos azoto, vandenilio, argono ar helio dujos su priemaišomis. Didelio srovės stiprio lankiniu išlydžiu jonizavus dujas, į plazmos srautą tiekiami milteliai. Jie yra išlydomi, įgreitinami ir dideliu greičiu bloškiami link dengiamojo substrato. Ištiškę mažai lašeliai kristalizuojasi ir sudaro dangą (Sevostianov *et al.* 2004).

Jonizuotųjų dujų temperatūra ir greitis kinta tiek didėjant atstumui nuo plazmotrono angos, tiek tolstant nuo plazmos centro. Dujų greičiui fেকেle daugiausia įtakos turi angos skerspjūvis, kuriam didėjant jonizuotųjų dujų greitis mažėja. Padidinus elektrolankinio išlydžio srovės stiprį į plazmą tiekiamų dujų debitą jonizuotųjų dujų greitis didėja (Sampath *et al.* 2001).

Dar vienas labai svarbus parametras – plazmos temperatūra. Iš plazmotrono išėjusių jonizuotųjų dujų maksimali temperatūra nedaug priklauso nuo lankinio išlydžio galios. Pagrindinis efektas, kuris pasiekiamas didinant elektrinio išlydžio galią, yra plazmos fakelo skerspjūvio didėjimas ir temperatūros gradiento mažėjimas tolstant nuo fakelo centro.

Plazminį purškimą galima atlikti atmosferoje bei vakuume. Purškimo aplinkoje ypač nepageidaujamas deguonis, kai reikia gauti švarias, neužterštas ir lengvai aukštoje temperatūroje besioksiduojančias metalines dangas, tokias kaip cirkonis, titanas, niobis (Sevostianov *et al.* 2004; Skopp *et al.* 2007). Šiuo atveju dangos sudaromos uždaroje kameroje, kurioje slėgis gali būti nuo 100 iki 5100 Pa.

Sumažinus slėgį, keičiasi plazmos fakelo savybės, todėl dangos pasižymi geresnėmis adhezijos savybėmis, jos būna daug grynesnės ir tankesnės (Ma *et al.* 2010).

Pagrindiniai plazminio purškimo pranašumai: procesas labai našus ir lengvai automatizuojamas; galima padengti įvairios formos ir įvairių matmenų bei formos detales (Beauvais *et al.* 2008). Dangos formavimas ant substrato vyksta labai greitai (iki kelių minučių) (Brossard *et al.* 2010). Galima gauti bet kokio norimo storio dangas, priklausomai nuo parinktos tūtos formos, skersmens, purškimo režimo ir purškiamosios medžiagos cheminės sudėties (Marcinauskas *et al.* 2015). Patogu reguliuoti šiluminį aplydymo režimą ir srauto greitį, aukšta plazmos temperatūra leidžia išlydyti įvairias medžiagas (geležies lydinius ir spalvotuosius metalus, karbidus, oksidus, keramiką, plastikus, kompozicines ir sunkialydes medžiagas ir kt.); gaunamos didelio tankio ir gerų adhezinių savybių dangos. Plazminio aplydymo zonoje galima sudaryti neutralią, oksiduojančiąją ar redukuojančiąją aplinką. Plazmos sraute nėra deguonies, todėl išlydomi ir dengiami metalai nesioksiduoja, taip padidinamas užpurkštos dangos tankis, o gaunamos dangos pasižymi gera adhezija (Vilys 2007; Zhu *et al.* 2015).

Plazminis purškimas pasižymi tam tikrais trūkumais – purškimo įrenginiai didelių gabaritų, įranga, eksploatacinės medžiagos (volframiniai ir lantaniniai elektrodai, argonas, helis, azotas ir kt.) ir plazmotronai labai brangūs, procesas triukšmingas, purškimo metu išsiskiria didelė infraraudonoji, ultravioletinė ir elektromagnetinė spinduliuotė, kuri kenkia darbuotojo sveikatai. Sudėtingas ir problemiškas aliuminio lydinių padengimas.

Užpurkštų dangų kokybei didelę įtaką turi miltelių kokybė, dydis, grūdelių pasiskirstymas pagal dydį, tankis, cheminė sudėtis, užterštumas, drėgnumas, tiekimą į plazmotroną būdas, lydymosi temperatūra, dengiamojo paviršiaus šiurkštumas bei paruošimas (Zhang *et al.* 2009).

Šaltojo purškimo metu dangos formuojamos naudojant didelę kinetinę energiją. Milteliai bloškiami itin dideliu (500–1500 m/s) greičiu link substrato. Susidūrimo metu kinetinė energija virsta šilumine, dalelės įkaista, deformuojasi ir sudaro tvirtą, mažai porėtą, geromis adhezinėmis savybėmis pasižyminčią dangą (Renzhong *et al.* 2014; Ajdelsztaj *et al.* 2006; Hermanek 2001). Tai vienas naujesnių terminio purškimo būdų. Atliekant šaltąjį purškimą, dangų dalelės nepraranda savo pradinės cheminės sudėties, nesioksiduoja ir neišdega legiruojančieji elementai, kadangi nėra išlydomos purškimo metu (Chromik *et al.* 2010). Šiuo būdu purškiamos ne tik metalinės, bet ir keraminės-kompozicinės dangos. Pastaruoju metu pradėtos tirti keraminės (TiO₂) dangos su specifine dalelių morfologija, kurią kitais purškimo būdais užpurkšti ant substrato labai sunku (Yamada *et al.* 2010).

Detonacinio purškimo metu naudojami deguonies, acetileno ar kitų dujų mišiniai, kurie išlydo purškiamuosius miltelius. Dujų mišinys padegamas elektros kibirkštimi, taip sukeliant sprogamą, kurio metu išsiskiria didelis šilumos kiekis,

išlydantis miltelius, o sproginimo banga nukreipia lašelius substrato link. Dangos, užpurkštos detonacinio purškimo metu, pasižymi itin aukšta kokybe, mažu oksidų kiekiu, geromis antikorozinėmis savybėmis (Gao *et al.* 2015; Wang *et al.* 2012). Šiuo būdu užpurškiamos trinčiai atsparios termobarjerinės ir aukštatemperatūrės, oksidacijai atsparios, keraminės didelio tankio dangos (Astakhov 2008). Dangu kokybė priklauso nuo naudojamų dujų mišinio, jų slėgio purškimo metu bei dujų greičio purškimo metu, kuris gali būti nuo 1000 iki 2000 m/s (Espallargas 2015). Šio purškimo įrangos savikaina itin didelė, tad šis terminio purškimo būdas naudojamas labai retai.

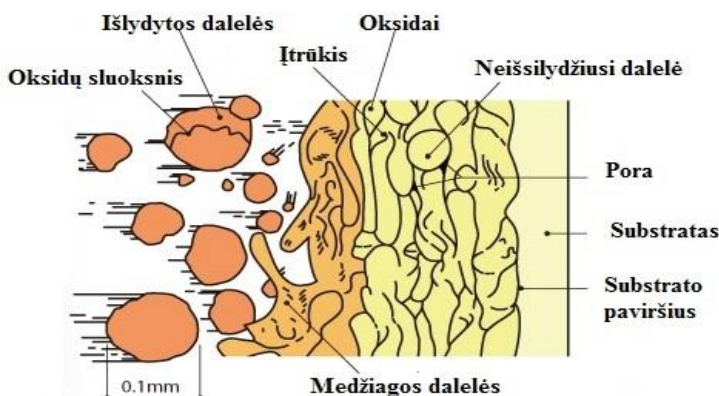
Didelio greičio dujinio liepsninio purškimo, arba HVOF (angl. *High Velocity Oxy-Fuel Spray*), proceso metu naudojami dideli deguonies ir degiųjų dujų (propano, propileno ar vandenilio) kiekiai. Specialiomis tūtomis pasiekiamas viršgarsinis purškimo fakelo dujų greitis, kur temperatūra siekia 2600–3000 °C. Dėl didelio purškimo greičio gaunamos tankios, mažai porėtos, gerai su pagrindu sukibusios dangos. Purškimo metu išlydytos medžiagos dalelės nesioksiduoja, nes jos karštame dujų sraute būna vos kelias milisekundes, o kinetinė energija yra didelė, tad dalelių nereikia įkaitinti iki lydymosi temperatūros (Murthy *et al.* 2006; Stewart *et al.* 2005; Tillmann *et al.* 2011). Didelio greičio dujiniam liepsniniam purškimui dažniausiai naudojami dviejų tipų pistoletai: žemo ir didelio slėgio. Žemo slėgio HVOF pistoletuose naudojamas slėgis nuo 0,24 iki 0,6 MPa su 600–700 MJ pakaitinimu, naudojant propileno, propano, vandenilio, metano dujas su deguonimi. Didelio slėgio HVOF pistoletuose nustatomas 0,62–0,82 MPa slėgis, žibalas ir deguonis arba įkaitintas oras iki 1 GJ dažniausiai naudojamas kaip terpė, kurioje lydosi purškimo milteliai (Gärtner *et al.* 2006; Poirier *et al.* 2013). Didelio greičio dujinio purškimo dangos pasižymi atsparumu abrazyviniam ir eroziniam dilimui (Jacobs *et al.* 1997), didesniu nei plazminiu būdu oro aplinkoje užpurkštos dangos, kadangi dalelės labai gerai sukimba su substratu ir danga būna mažai porėta, taip pat purškimo metu dangoje vyksta mažiau fazinių virsmų. Dėl žemos fakelo temperatūros HVOF būdu negalima substratų padengti keraminėmis medžiagomis, kadangi didelio greičio dujų sraute ir dėl blogo šilumos laidumo dalelės nespėja įkaisti iki plastinės būklės (Tamulevičius 2007; Oksa *et al.* 2011). Purškimo metu sunaudojamas didelis dujų kiekis, kuris didina HVOF proceso savikainą.

1.2. Terminiu būdu užpurkštų dangu formavimasis ir jų savybės

Terminio purškimo metu paviršiuje susidaro danga iš lankinio išlydžio plazmoje ar dujų liepsnoje išlydytos medžiagos dalelių. Dangos savybės priklauso nuo užpurškiamos medžiagos dalelių judėjimo dujų sraute ir susidūrimo su paviršiumi

sąlygų, jų įkaitinimo, tarp užpurkštų dalelių atsiradusių ryšių, zonos, esančios tarp dangos ir paviršiaus, struktūros (Valiulis 2005). Užpurškiant dangas aukštos temperatūros dujinėje terpėje, išlydytos dalelės dujų srautu juda link substrato paviršiaus ir pasidengia oksido plėvele. Išsilydę metalo lašeliai, susidūrę su paviršiumi, subliūkšta, oksido plėvelė suyra ir tose vietose prisilydo prie substrato. Taip paviršiui atiduodama energija, sukaupia išlydyto metalo lašelyje (Ivosevic *et al.* 2006; Raessi *et al.* 2006). Skystiems metaliniams lašeliams auštant, vyksta kristalizacija substrato paviršiuje, sudarydama ploną metalinę dangą. Terminiškai purkštose dangose aptinkama neišsilydžiusių dalelių ir tuštumų. Formuojamos dangos paviršius dažniausiai neįkaista daugiau nei 200 °C, šiuo atveju dangos paviršiuose nevyksta jokie faziniai pokyčiai ar deformacijos (Froning *et al.* 2008). Purškiant terminiu būdu, medžiagos dažniausiai į purškimo zoną tiekiamos vielos, miltelių ir skysčių pavidalu (Gozali *et al.* 2015; Li *et al.* 2003; Marchand *et al.* 2008). Bene visi terminio purškimo procesą tiriantys mokslininkai pažymi, kad dangų savybės lemia daugybė faktorių, tokių kaip purškimo būdo parinkimas, purškimo parametrai ir technologija, gaunamos dangos storis, dangos paviršiaus temperatūra ir medžiagos savybės (Fang *et al.* 2007). Šie parametrai nulemia dangų paskirtį.

Terminio purškimo dangų struktūra dažniausiai būna nevienalytė (Pawlowski 2008). Dangos struktūros formavimui įtakos turi purškiamosios medžiagos cheminė sudėtis, paviršiaus paruošimas, purškimo parametrai, atstumas tarp purškimo pistoleto ir dengiamojo substrato, užpurkšto paviršiaus temperatūros išlaikymas, parinktas purškimo būdas. 1.5 paveiksle pateikta dangos susidarymo schema purškimo metu. Purškiant metalą lašelių aušimo greitis siekia 10^6 – 10^8 °C/s, o purškiant keramiką 10^4 – 10^6 °C/s, dėl to lašeliai kristalizuojasi per labai trumpą laiko tarpą (Fauchais *et al.* 2014).



1.5 pav. Dangos formavimasis purškimo metu

Fig. 1.5. Coating forming on the substrate

Dalelių susijungimas įvyksta joms mechaniškai sukimbant, o atskirais atvejais ir prisivirinant su substrato makronelygumais ir substratą dengiančio plono oksido sluoksnio pažeidimo vietomis. Oksidų plėvelės pažeidimo vietose vyksta lašelių susilydymas su substratu (mikrosusivirinimas). Tarp lašelių pasitaiko ir ne visai išsilydžiusių arba apsilydžiusių dalelių, tai priklauso nuo legiruojančiųjų dalelių dydžio vielos sudėtyje ir purškimo fakelo koncentracijos. Be to, dangoje atsiranda dujomis užpildytų tuštumų, kurių kiekis lemia dangos porėtumą.

Galima išskirti kelias pagrindines dangų grupes:

- aukštai temperatūrai atsparios, šilumos izoliacinės ir termobarjerinės dangos, siekiant padidinti jų atsparumą karščiui, reikia dengti tankia danga, turinčia gerą šiluminį laidumą (Yang *et al.* 2014). Taip pašalinamas šilumos perteklius, veikiantis dangos paviršių. Norint gauti geras šilumos izoliacines savybes, danga turi pasižymėti dideliu porėtumu ir mažu šilumos laidumu. Kai darbo sąlygoms būdingi dažni terminiai smūgiai, taip pat reikia naudoti porėtas dangas, o esant dujinio ir erozinio dėvėjimosi sąlygoms, kad padidėtų atsparumas trinčiai, patartina didinti dangos tankį. Dangų atsparumą aukštai temperatūrai ir šilumos izoliacines savybes lemia šiluminis dangos laidumas, porų kiekis, oksidų pasiskirstymas dangos tūryje, jų matmenys ir formos (Varis *et al.* 2014);
- elektrinės dangų savybės priklauso nuo porėtumo ir oksidų kiekio dangose. Elektrinis laidis didės didinant dangos tankį ir mažinant oksidų kiekį, o norint gauti dangas, pasižyminčias geromis dielektrinėmis savybėmis, reikia didinti porų ir oksidų kiekį dangose;
- atsparios korozijai dangos turi pasižymėti dideliu tankiu ir kuo mažesniu porėtumu, ne didesniu nei 1 %, taip pat neturėti vertikalų plyšių ar mikroįtrūkių, pro kuriuos iki dangos gali prasiskverbti agresyvi aplinka. Itin atsparios dangos korozijai nikelio pagrindu, kurių sudėtyje yra cinko, aliuminio ar vario lydinų;
- atsparios dilimui ir frikcinėms savybėms dangos, eksploatuojamos sausos trinties sąlygomis ir esant tepimui, pasižymi skirtingomis struktūromis, o kartais net gali ir skirtis priklausomai nuo sudedamųjų dangos dalių. Dangos matrica gali būti sudaryta iš kietų karbidinių ar specialios paskirties keraminių darinių, o paviršiniai sluoksniai padengti minkštesnėmis dangomis. Tokie kelių dangų sluoksniai sumažina paviršiaus dilimą (Wank *et al.* 2006; Freisen *et al.* 2010). Tokio pobūdžio dangomis dengiamos turbinų mentelės. Dažnai paviršiniai sluoksniai būna sudaryti iš nikelio/grafito, nikelio/bentonito dangų (Davis 2004). Didelis dangų kiekumas dažniausiai nulemia mažą paviršių dėvėjimąsi. Tačiau šiam reiškiniiui gali turėti įtakos ir dangų tamprumo modulis. Norint pagerinti medžiagos ar apsauginės dangos atsparumą dilimui, reikia vienu metu

- didinti medžiagos kietumą ir tamprumo modulį. Dangose, eksploatuojamos su tepimu, pageidautinas kuo didesnis porų kiekis, o esant sausajai trinčiai reikia stengtis kuo daugiau padidinti dangos kietumą. Tokiu atveju naudojamos dangos, kurių sudėtyje purškimo metu suformuojami karbidiniai dariniai (Bach *et al.* 2006; Froning *et al.* 2008). Abrazyvinis dangų dilimas pasireiškia, kai paviršiusirsta dėl jo sąveikos su kietosiomis dalelėmis, esant santykiniam greičiui. Abrazyvinė medžiaga, kurios grūdeliai, būdami gana kieti, turi galimybę pjauti–rėžti (Serapinas 1999). Abrazyviniam dilimu įtakos turi abrazyvinės dalelės dydis, tribologinių paviršių šiurkštumas, terpių agresyvumas, smūginė sąveika, įkaitinimas. Abrazyvinis dilimas turi įvairių ypatumų, bet bendras abrazyvinio dilimo bruožas yra mechaninis tribopaviršių irimas. Abrazyvinės dalelės yra įvairių formų. Abrazyvinių grūdelių geba įsispausti į paviršių priklauso ne tik nuo jų kietumo, bet ir nuo geometrinės grūdelio formos.
- antikorozinės dangos. Padengus metalą mažiau aktyviu metalu, gaunama katodinė danga. Pažeidus katodinę dangą, koroduoja padengtasis metalas, o danga nekoroduoja. Padengus metalą aktyvesniu metalu, gaunama anodinė danga. Pažeidus anodinę dangą, koroduoja dangos metalas, o padengtasis metalas apsaugomas nuo korozijos. Todėl, kai yra pavojus, kad eksploatacijos metu danga gali būti pažeista, metalai dengiami anodine danga (Jankauskas *et al.* 2008). Norint padengtą paviršių apsaugoti nuo korozijos agresyvioje aplinkoje, o ne tik užtikrinti atsparumą dilimui, dangos užpurškiamos keliais sluoksniais. Pirmasis dangos sluoksnis apsaugo padengtąjį paviršių nuo korozijos, antrasis ir kiti sluoksniai padidina atsparumą dilimui. Dangos turi būti gerai sukibusios su dengiamuoju substrato paviršiumi ir pasižymėti mažu vidinių defektų kiekiu (Santa *et al.* 2009; Šulčius 2006);
 - keraminės dangos. Keraminės medžiagos dažnai naudojamos darbui aukštoje temperatūroje (iki 1700 °C) ir korozinėje aplinkoje, kadangi jos yra atsparios šilumos poveikiui, kietos ir chemiškai inertiškos (Aliofkhazraei 2014; Chen *et al.* 2015; Xu *et al.* 2010; Xu *et al.* 2009). Plazminių būdu užpurkštos Cr_2O_3 , Al_2O_3 , ZrO_2 ir TiO_2 dangos yra atsparios abrazyviniam dilimui, nes tepalas laikosi jų porose ir sumažina kontaktuojančių paviršių tarpusavio trintį. Šiuo būdu užpurkšta Cr_2O_3 danga yra labai atspari cheminiam poveikiui. TiO_2 danga naudojama ten, kur reikalinga maža trintis. Keraminėms dangoms, išskyrus SiO_2 ir ZrO_2 dangas, būdingas didelis šiluminio plėtimosi koeficientas, todėl, esant cikliniam temperatūrų poveikiui, dangoje susidaro dideli įtempiai ir ji pradeda skilinėti ir trupėti (Wang Z. *et al.* 2015). Cirkonio, stabilizuoto itriu, kera-

minės dangos dėl prasto šilumos laidumo naudojamos kaip terminės barjerinės dangos. Jos tinka aviacijoje dujų turbinų degimo kameroms padengti. Dangos variklio viduje atlaiko agresyvios aplinkos poveikį.

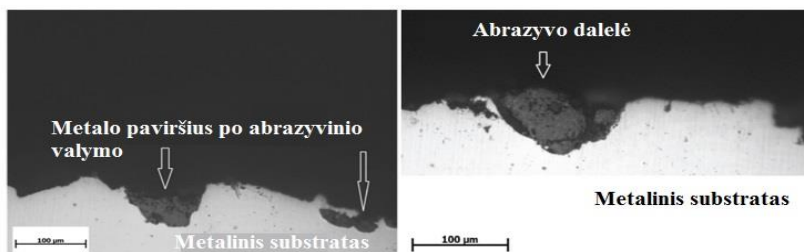
1.3. Dengiamojo substrato paviršiaus valymas

Visi tyrėjai pažymi, kad geros kokybės terminio purškimo dangos gaunamos tik tinkamai paruošus paviršių, ant kurio jos yra purškiamos. Dėl drėgmės, riebalų sluoksnio ar kitų teršalų dangoje atsiranda defektų, mažėja dangų adhezija su substratu. Substrato paruošimo metu nuvalomi oksidai, riebalai, rūdys ir kiti nešvarumai. Bandiniai gali būti valomi lazerio ar plazmos srautu, kartais bandiniai net kaitinami prieš apipurškimą norint pašalinti drėgmę (Sundar *et al.* 2009; Guan *et al.* 2013; Paredes *et al.* 2006).

Dangos kokybei įtakos turi paviršiaus šiurkštumas po valymo. Didelis substrato šiurkštumas pagerina dangos sukibimą, kadangi padidėja dangos ir paviršiaus sąlyčio plotas. Paviršiaus mikronelygumų viršūnės, veikiamos išlydytų dalelių srauto, įkaista labiau nei lygus paviršius. Tai didina sąveikos laipsnį, gerina sukibimą. Dažniausiai bandiniai valomi mechanškai įvairios gradacijos abrazyvinėmis medžiagomis. Tačiau paviršius gali būti valomas ir naudojant kelis skirtingus būdus. Paprastai išskiriami šie valymo būdai: mechaninis, terminis, cheminis, elektrocheminis ar fizikinis. Šie būdai gali būti naudojami ir kartu. Paviršiaus valymo technologija parenkama pagal dangų padengimo būdą, naudojamas medžiagas, dangų apdorojimo būdą.

Mechaniškai paviršiai dažniausiai valomi kvarciniu smėliu ar stambiu abrazyvu, šratų srautu, šepečiais, apdorojami įvairiuose šlifavimo būgnuose (Meletis *et al.* 2002). Apdorojant smėlio srautu paviršiui suteikiamas norimas šiurkštumas. Jis gali priklausyti nuo smėliavimo metu naudojamų medžiagų gradacijos, antgalio posvyrio kampo ir valymo trukmės. Naudojami 0,5–2,5 mm smėlio, aliuminio oksido, silicio karbido grūdėliai. Autoriai (Farrell *et al.* 2007) pažymi, kad ypač svarbu parinkti tinkamą abrazyvinio valymo technologiją ir vizualiai po valymo įvertinti paviršių. 1.6 paveiksle pateikti standartiniai defektai, ypač būdingi minkštomis smėliuojamoms medžiagoms, kai abrazyvo dalelės įsiskverbia į substratą ir jame pasilieka. Šie defektai blogina pirmojo užpurkšto sluoksnio sukibimą su substratu ir dažnai tampa blogos dangų adhezijos priežastimi.

Hidraulinis smėliasrautinis paviršių valymo būdas taikomas ruošiant didelių matmenų paviršius pramoniniu būdu. Šiuo būdu valant paviršių į jį nukreipta stipri abrazyvo srovė. Gali būti naudojamas maltas šlakas, elektrokorundas, kvarcinis smėlis ar kitos smulkios ir kietos dalelės, kurių dydis 0,15–0,5 mm, skystis – vanduo su aktyviosiomis medžiagomis, galinčiomis pašalinti tepalus, ir korozijos inhibitoriai, apsaugantys valomąjį paviršių nuo korozijos židinių susidarymo. Po hidraulinio smėliavimo bandiniai sausinami.



1.6 pav. Defektai, atsiradę abrazyvinio valymo metu
Fig. 1.6. Defects, appeared at a abrasive cleaning time

Paviršius valant metalinių šratų srautu, naudojami ne didesni nei 0,8 mm skersmens šratai. Didesnio skersmens šratai nenaudojami, kadangi po valymo lieka didesnės duobutės, kurios neigiamai veikia formuojamos dangos fizikines ir mechanines savybes. Tokiu būdu yra šalinamos rūdys, nuodegos. Paviršius po valymo suketinamas.

Terminiu būdu dažniausiai valomi dažai, rūdys, šlakai, įvairūs tepalai. Detalės ar gaminiai kaitinami gamtinių dujų ir deguonies krosnyse su oksidatoriais ar reduktoriais nuo 500–600 °C temperatūroje, o elektrinėse krosnyse nuo 1300–1400 °C temperatūroje. Toks valymo būdas dažniausiai taikomas storasieniams gaminiams, kadangi rūdžių ir nuodegų temperatūrinis plėtimosi koeficientas nedidelis, jos sutrūkinėja, atsislukšniuoja ir tokiu būdu lengvai pašalinamos nuo paviršiaus.

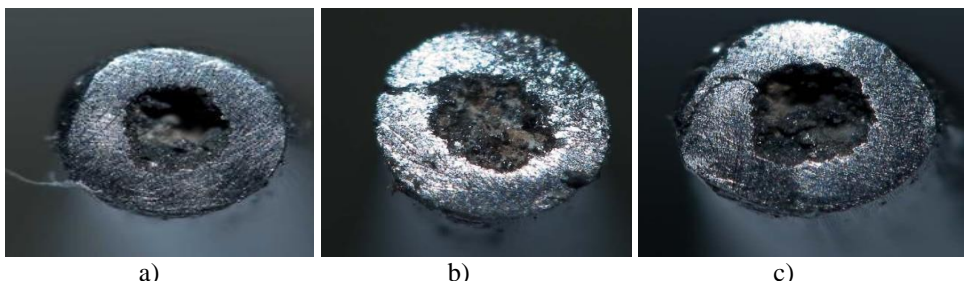
Cheminiu būdu pašalinamos rūdys, seni dažai, nuodegos. Sieros, druskos ar azoto ir šarminių reagentų komponentai lengvai pašalina rūdį. Riebalai ir organiniai teršalai pašalinami plaunant organiniais tirpalais (žibalu, benzinu, dyzelinu, acetonu, benzolu, trichloretilenu), organinių tirpiklių vandeninėmis emulsijomis, vandeniniais neutraliais, šarminiais arba rūgštiniais tirpalais. Pašalinus riebalus detalės nuplaunamos karštu vandeniu.

Ultragarsiniu valymu gerai pašalinami riebalai ar kitokie teršalai nuo sudėtingos konfigūracijos detalių, turinčių sunkiai prieinamų valyti vietų. Ultragaršiam detalių valymui naudojami pjezoelektriniai arba magnetostrikciniai virpesių keitikliai (Griškonis *et al.* 2008). Detalės sudedamos į indą su hidroabrazyvine terpe ir indas įstatomas į vonią su skysčiu, kurios dugne įmontuoti virpesių keitikliai. Virpesiai nuo keitiklių paviršiaus per skystį perduodami hidroabrazyvinei terpei. Valant detales ultragarsu, padidėja jų paviršiaus kietumas, sumažėja šiurkštumas, susidaro liekamieji įtempiai paviršiniuose metalo sluoksniuose (Fuchs 2014), kurie gali turėti neigiamų savybių atliekant paviršių dengimą įvairiomis dangomis. Paruoštas (aktyvintas) paviršius greitai praranda savo savybes, nes absorbuoja dujas (oksiduojasi), drėgmę, todėl jį reikia padengti kuo greičiau: dirbant uždaroje patalpoje – per 6 valandas, atvirame ore – per 3 valandas, o labai drėgname atvirame ore – per 30 minučių. Paruošti paviršiai neturi liestis su tepalais ir

kitais teršalais (Vilys 2007). Valymas ultragarsu turi ir teigiamų savybių: ultragarso bangos kartu su abrazyvu patenka į sunkiai prieinamas detalių ar paviršių vietas ir jas gerai išvalo.

1.4. Miltelinių vielų ir užpildo gamybos technologijos

Miltelinė viela – tai plieninis apvaskalėlis su supresuotų miltelių šerdimi. Šerdis pagaminta iš legiravimo sistemą sudarančių elementų. Paviršinių sluoksnių legiravimas atliekamas tada, kai naudojamos vielos, kurių sudėtyje yra chromo, mangano, nikelio ar kitų legiruojančiųjų elementų. Keičiant mišinio sudėtį, galima gauti įvairios cheminės sudėties paviršines dangas, pasižyminčias reikalingomis mechaninėmis ir fizikinėmis-cheminėmis savybėmis. Ruošiant miltelinių vielų užpildą, būtina atsižvelgti ir į tai, kiek lydymosi metu išdega ir išgaruoja į mišinį įdėtų įvairių elementų (elektrolankinio purškimo metu gali išdegti nuo 10 iki 50 % legiruojančiųjų elementų, tai priklauso nuo jų sudėties vieloje), kad, išsilydžius miltelinei vielai, ataušęs skystas lydinys būtų norimos cheminės sudėties. Šiuo metu miltelinės vielos gaminamos nuo 1,6 iki 3,6 mm skersmens. Išlydyto metalo kiekis purškimo metu priklauso nuo medžiagų kiekio šerdyje, šerdies sudėties, vielos konstrukcijos bei purškimo režimų parinkimo. Miltelinės vielos yra gaminamos iš metalinės juostelės, kuri pradžioje suformuojama į „U“ tipo formą, tuomet pripildoma sausu miltelių mišiniu ir toliau suformuojama į vamzdelį. Vėliau vamzdelis pratempiamas iki reikiamo vielos skersmens. Šis gamybos būdas yra paprastesnis, bet turi keletą trūkumų: drėgmė gali patekti į užpildą bei iškyla problemų su tolygiu legiruojančiųjų elementų užpildymu (Widgery 1994). 1.7 paveiksle pateiktos miltelinių vielų formos, kurios dažniausiai naudojamos elektrolankinio purškimo vielų gamyboje.



1.7 pav. Miltelinių vielų formos, naudojamos elektrolankinio purškimo vielų gamyboje: a) ištisinė, b) sandūrinė, c) užleistinė

Fig. 1.7. The shapes of the cored wires, which was used in the thermal arc spraying manufacture: a) solid wire, b) butt wire, c) splice wire

Vielos užpilde esanti drėgmė (vanduo) elektros lanke skyla į deguonį ir vandenilį. Pastarasis ištirpsta skystame metalo lašelyje ir kristalizuojantis sudaro poras. Siekiant išvengti šio neigiamo vandenilio poveikio, prieš purškimą viela džiovinama. Deja, vielos užvalcavimas ne visuomet leidžia drėgmei pasišalinti iš vielos šerdies. Šių trūkumų neturi ištisinė miltelinė viela, kadangi drėgmei nėra pro kur patekti į vielos šerdį.

Palyginus miltelines vielas su įprastinėmis ištisinėmis plieninėmis vielomis, skirtomis elektrolankiniam purškimui, srovė jomis teka mažesniu skerspjūvio plotu, taigi srovės tankis miltelinėje vieloje yra didesnis esant vienodam srovės dydžiui, todėl jos turi didesnę našumą. 1.8 paveiksle pateikta miltelinių vielų formavimo technologija, kai iš juostos suformuojamas vamzdelis, kuris suvirinamas aukštu dažniu, vėliau atliekamas atkaitinimas, kad vamzdelio sienelės būtų vientisos struktūros, gaunama ištisinė viela. Vėliau užpildoma milteliais, o traukiant per trauktuves formuojama norimo skersmens viela, kurios išorė varijuojama siekiant pagerinti antikoroazines vielos savybes bei užtikrinti gerą srovės tiekimo kontaktą. Šis vielų formavimo būdas geras tuo, kad purškimo metu išvengiama atominio vandenilio patekimo į formuojamą dangą.

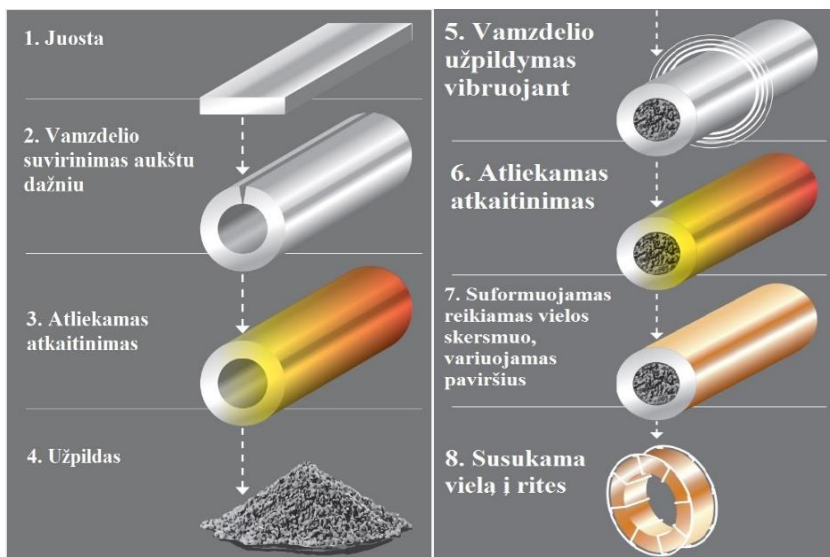
Miltelinių vielų užpildai gaminami iš skirtingų cheminių medžiagų. Prieš užpildant vielos strypelius legiruojančiosiomis medžiagomis, jos susmulkinamos, o dispersiškumas priklauso nuo medžiagos rūšies ir smulkinimo būdo.

Miltelinių medžiagų gamyboje labiausiai paplitę yra mechaninio smulkinimo, cheminiai, hidrometalurginiai ir elektroliziniai metodai. Mechaniniais smulkinimo metodais milteliai gaunami žaliavą malant ar kitais būdais sudarant drožles ir smulkias užpildo daleles. Šie smulkinimo būdai gana paprasti ir našūs, pasižymintys paprasta technologija, greitai gaunami dideli susmulkintos medžiagos kiekiai. Mechaninis malimas labai dažnai naudojamas miltelių metalurgijos, vielų ir mineralų apdorojimo pramonėje. Šis metodas taikomas maišant skirtingus miltelių komponentus. Mechaniškai malant, miltelių dalelės susmulkinamos, tačiau nepakeičiama jų vidinė struktūra. Šio proceso metu miltelių dalelės stipriai nedeformuojamos ir jos nesusivirina tarpusavyje. Mechaninio malimo metu galima sintetinti labai skirtingų rūšių medžiagas: amorfinių lydinų miltelius, lydinų miltelius, metastabilios fazės medžiagas, sintetinti metališųjų ir kitų junginių miltelius. Mechaniniai smulkinimo metodai gana nesudėtingi ir paprastos technologijos. Svarbiausi šio smulkinimo trūkumai – susmulkintų dalelių užteršimas malūnų ritinių ar rutulių medžiaga (Valiulis 2012), gaunami nevienodo granulimetrio dydžio milteliai.

Didžiausias miltelių gamybos našumas pasiekiamas malimo malūnuose. Malamas medžiagas veikia smūgiai, trintys, šlytis, kuri ir susmulkina žaliavą. Milteliai po malimo būna įvairios formos ir dydžio (Redjda *et al.* 2013). Mechaninio malimo būgnuose dažniausiai smulkinamos įvairios metalinės, keraminės bei į-

vairios kitos trapios medžiagos. Milteliai po malimo būna įvairios formos ir dydžio, tai labai priklauso nuo medžiagos plastiškumo ir trapumo. Plastiškos medžiagos susmulkintų dalelių forma dažniausiai būna plokščia, trapiųjų medžiagų būna aštrių briaunų ir taisyklingos formos.

Taikant drožlės sudarymo ar tekimo metodus, dažniausiai gaminami milteliai iš strypinių ruošinių juos tekan, o vėliau gautas metalines drožles smulkinant, malant ir taip gaunant reikiamo dydžio miltelius.



1.8 pav. Miltelinės ištisinės vielos gamyba

Fig. 1.8. The manufacture of continous cored wires

Vielų užpildai taip pat gaminami redukuojant metalo oksidus, taikant šiluminę junginių disociaciją ar nusodinant metalus iš tirpalų. Žaliava gali būti geležies rūda ar geležies oksidai. Kai naudojama geležies rūda, karščiui atsparaus metalo vamzdis užpildomas geležies rūda, anglies, kokso ir kalkių mišiniu. Vamzdis kaitinamas krosnyje 1200 °C temperatūroje. Vykstant cheminėms reakcijoms susidaro redukuojanti atmosfera, geležis redukuojama iš magnetinės geležies rūdos. Gaminant miltelius šiuo būdu gaunami grūdėliai yra netaisyklingos formos, turi didelį paviršiaus plotą, pasižymi dideliu porėtumu.

Milteliai gaminami hidrometalurginiu ir terminio junginių disociacijos būdais elektrolizės principu. Kaitinimo metu metalo rūda ar įvairūs metalų hidroksidai skyla, o vėliau redukuojami iki gryno metalo. Milteliai dažniausiai būna įvairios formos – nuo apvalios iki kampuotos.

Elektrolitiniu metalų miltelių gamybos būdu metalo atomai skiriasi ant elektrolitinės celės katodo, taip susiformuoja nusodinto metalo sluoksnis, kuris vėliau

smulkinamas kitais mechaniniais būdais. Milteliai, gaminami šiuo būdu, pasižymi dideliu švarumu, būdinga dendritinė struktūra. Dažniausiai šiuo metodu išgautami vario milteliai.

1.5. Miltelinių vielų kūrimo principai

Legiravimo būdas per miltelines vielas – vienas iš patikimiausių užpurkštos dangos legiravimo būdų, kuriuo pasiekiamas stabilus procesas (viela lanksti, nekyla problemų tiekiant), užpurškiant metalinius paviršius. Šiuo atveju legiruojantieji elementai (priedai) gali būti apvalkale arba įdedami metalo miltelių pavidalu į vamzdelinio skerspjuvio vielos vidų. Legiravimas per vielos vamzdelį – pakankamai paprastas ir efektyvus būdas. Deja, ne visada gali pavykti parinkti reikiamos sudėties vamzdelį, todėl plačiai naudojamas legiravimo būdas, keičiant šerdies užpildo cheminę sudėtį.

Kaip legiruojantys priedai daugiausia naudojami įvairūs milteliniai, metalurginiai pusgaminiai. Tokie milteliai įdedami su kitais komponentais į vielos šerdies mišinį maišymo metu. Metalų milteliai atlieka legiruojančiojo komponento funkciją, o siekiant sumažinti nuostolius oksidavimosi metu, tikslinga naudoti didesnės granulometrinės sudėties frakcijas. Tačiau pernelyg didelis miltelių grūdelių matmenų didinimas apsunkina vielų gamybą, pablogina jų technologines charakteristikas.

Miltelinių vielų su išteklius tausojančiais ekonomiškai legiruotais priedais, pasižyminčiais aukštomis technologinėmis savybėmis ir užtikrinančiais aukštą užpurškiamos dangos kokybę, technologijų tobulinimas, kūrimas ir įdiegimas buvo ir yra labai aktualus.

Atsižvelgiant į norimą gauti efektą, legiruojančiųjų elementų į vielų užpildo sudėtį gali būti pridedama pavieniui arba grupėmis įvairiu santykiu. Literatūros šaltiniuose pažymima, jog dažniausiai kaip legiruojantieji elementai naudojami pereinamieji metalai, kurie periodinėje elementų lentelėje yra artimi geležiai: chromas, nikelis, volframas, molibdenas, titanas. Miltelinių vielų gamyboje naudojamos medžiagos ar jų komponentai lemia dangų savybes ir naudojimo sritį. Nedidelis silicio kiekis dangose jas sustiprina, padidina tamprumo ribą, padidėja kietumas ir atsparumas dilimui. Didžiausias silicio trūkumas yra tas, kad jis blogai suderinamas su anglimi. Jis padeda, kad anglis virstų laisvu grafitu, tad padidėja pavojus suformuotose dangose atsirasti įtrūkiams. Silicis didina atsparumą atmosferinei korozijai ir susidarantioms nuodegoms, ypač jį derinant su chromu ir aliuminiu, kai dangos turi dirbti aukštoje temperatūroje. Grūdinimo metu silicis dangose padidina įgrūdinamumą, o atleidimo metu padidina atsileidimo temperatūrą, todėl jis labai pageidautinas.

Kaip pagrindinis dezoksidatorius ir desulfurizatorius vielų užpildo gamyboje naudojamas manganas. Jis, kaip ir silicis, padidina dangų stiprumą. Esant mangano, dangose pagerėja šaltojo deformavimo galimybės. Dangų atsparumas atmosferinei korozijai padidinamas tik tais atvejais, jei mangano yra daugiau kaip 10 %. Taip pat perlydytos dangos pasižymi dideliu atsparumu dilimui, jei jų sudėtyje yra 12 % mangano ir 1,2 % anglies, kadangi dangose aptinkamas ryškus deformacinis sukietinimas. Manganas, kaip ir silicis, labai padidina įgrūdinamumą, tačiau dėl jo atsiranda perkaitimo tikimybė – auga austenito užuomazgos, esant vidutiniam anglies kiekiui. Siekiant išvengti šio nepageidautino reiškinių į vielų legiravimo sistemas pridedama chromo, vanadžio ar molibdeno.

Chromo įtaka dvejoja. Jis didina dangų stiprumą ir beveik nemažina tūsumo (Kulikauskas 1997). Kelis pastaruosius dešimtmečius naudojamos dangos su chromo, kobalto ir volframo legiruojančiaisiais elementais, kurie paviršių apsaugo nuo išorinio dilimo. Gausiai chromu legiruotose dangų mikrostruktūrose aptinkami Cr₂₃C₆ bei Cr₇C₃ karbidiniai dariniai, kurie sudaro tvirtus junginius dangų struktūrose, taip gerindami tribologines dangų savybes (Yilmaz et al. 2011; Matthews et al. 2009; Wank et al. 2006; Wielage et al. 2006; Zimmermann et al. 2008; Lugbauer et al. 2006; Sancakoglu et al. 2015). Pramonėje plačiai naudojamos elektrolankinio purškimo vielos, kurių sudėtyje chromo kiekis vidutiniškai varijuoja nuo 1 iki 5 %. Tokį pasirinkimą lemia sąlygiškai nedidelė vielų kaina ir gaunamos geros mechaninės dangų savybės.

Pagrindinės nikelio savybės išryškėja derinant su chromu, tačiau naudojant tokį derinį gaunamas padidėjęs atleidimo trapumas, tai nepageidautinas reiškinys, kurį pašalinti galima tik naudojant molibdeno ar volframo legiruojančiuosius elementus. Nikelis neturi įtakos atleidimo procesui. Dangų lamelių struktūra smulkėja ir padidėja dangų tūsumas. Nikelis nesudaro kietų, atsparių dilimui karbidinių darinių, tik didina liekamojo austenito kiekį. Esant dideliame nikelio kiekiui (35 %), dangos pasižymi itin mažu šiluminiu plėtimosi koeficientu. Dažniausiai su nikeliumi, chromu pridedamas ir molibdenas. Jis padidina dangų stiprumą, nesumažindamas plastiškumo, o kartu ir padidindamas įgrūdinamumą. Molibdenas didina šiluminį ir korozinį atsparumą.

Autoriai pažymi, jog volframas artimas molibdenui. Jo pridėjus į miltelinių vielų legiravimo sistemą, padidėja šiluminis patvarumas, atsparumas dilimui ir dangų kietumas. Volframas sudaro labai patvarius karbidus. Esant aukštai temperatūrai jie tirpsta austenite (Davim 2012). Daugelyje literatūros šaltinių teigiama, jog dangos su volframo ir kobalto karbidausi pasižymi dideliu atsparumu trinčiai, kuri priklauso nuo dangos storio ir dangoje esančių įtempių pasiskirstymo (Santana et al. 2008; Liu et al. 2016). Prchlik et al. (2001), savo darbe lygindamas Mo-Mo₂C ir WC-Co dangas, nustatė, jog abi dangos su panašiu geležies kiekiu pasižymi beveik identiškomis tribologinėmis savybėmis, vadinasi, jog ne tik purškia-

mos medžiagos cheminė sudėtis gali turėti įtakos dangų tribologinėms ar fizikinėms savybėms. Autorius pažymi, kad šioms savybėms labai didelę įtaką turi dangos porėtumas ir susidariusių skirtingų karbidų kiekis dangose bei purškimo technologijos parinkimas.

Kituose literatūros šaltiniuose (Wang *et al.* 2015; Hadad *et al.* 2007; Jacobs *et al.* 1998) teigiama, jog volframo, kobalto ir chromo trikomponentės legiravimo sistemos (Fe-Cr-Co-W) užtikrina itin gerą paviršių apsaugą esant sausajai trinčiai. Tačiau tai priklauso nuo dangos purškimo būdo ir suformuotos dangos paviršiaus šiurkštumo. Užpurškus WC-CoCr dangas HVOF būdu ir testuojant jas ant besisukančio disko su kietu indentoriumi, (POD) bandymu pastebėta, jog dangos, pasižyminčios glotnesniu paviršiumi, svorio netenka mažiau per nustatytą tam tikrą bandymo laiką (Jacobs *et al.* 1998). Dėl didelio volframo kiekio (30 %) WC-CoCr vielų ekonominis rentabilumas keletą kartų mažesnis, jas lyginant su vielomis, kurių legiravimo sistemos pagrindą sudaro chromas. Pagal mechanines ir fizikines savybes dangos su dideliu chromo kiekiu pasižymi panašiu kietumu bei geromis tribologinėmis ir antikorozinėmis savybėmis (Sancakoglu 2015).

Nedideli aliuminio kaip legiruojančiojo elemento kiekiai naudojami siekiant susmulkinti, o didesni kiekiai – sustambinti lamelės metalo struktūrą.

Rečiau legiravimo sistemoje naudojami kobalto užpildai. Vienas kobaltas nesudaro karbidų ir savo savybėmis gana panašus į nikelį, tačiau maišant kobaltą su chromu ar volframu padidinamas dangų kietumas, stiprumas, atsparumas dilimui, lamelių struktūra susmulkėja.

Titano, tantalio, niobio ir cirkonio elementai įvairiose miltelinėse vielų gamybos ir legiravimo sistemose dedami tam, kad sudarytų patvarius karbidinius junginius (Gan *et al.* 2015), kurie neleistų susidaryti tarpkristalinei korozijai.

Purškiamųjų medžiagų cheminės sudėties optimizavimas leidžia pasiekti pageidaujamų dangų savybių. Cheminė elektrolankinio purškimo vielų sudėtis lemia fazinę sudėtį ir fazių pasiskirstymą dangose (Bodzin *et al.* 2009).

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Taikant įvairius dangų formavimo būdus, galima gauti skirtingas dangas, optimaliai pritaikytas eksploatacinėms sąlygoms, tačiau įvertinant procesų našumą ir ekonominį rentabilumą, tikslinga naudoti elektrolankinio purškimo procesą.
2. Dėl nepakankamo sukauptų rezultatų sisteminimo neįmanoma vienareikšmiškai spręsti apie purškiamų dalelių granulometrijos įtaką dangų morfologijai.

3. Literatūroje yra informacijos apie terminio purškimo dangų formavimosi ypatumus, tačiau per mažai analizės, kaip elektrolankinio purškimo proceso parametrai ir susiformavusių dangų morfologija užtikrina optimalias eksploatacines savybes.
4. Miltelinių vielų kūrimas (keičiant užpildą) ir taikymas elektrolankinio purškimo procese leidžia gauti įvairios cheminės sudėties dangas, tačiau jų pritaikomumas ištirtas nepakankamai.

Apibendrinus literatūros analizę suformuluoti šie spręstini uždaviniai:

1. Ištirti sukurtas naujos cheminės sudėties miltelines vielas, kurios pasižymėtų tinkamumu purškimo procesui ir galėtų pakeisti šiuo metu rinkoje esančias ekonomiškai mažiau rentabilias vielas, skirtas plienų paviršiui stiprinti ar restauruoti.
2. Nustatyti purškiamų fakelo dalelių įtaką dangų morfologijai.
3. Nustatyti dangų cheminės sudėties ir technologinių parametų įtaką mechaninėms savybėms.
4. Nustatyti dangų technologinių parametų, morfologijos, cheminės sudėties įtaką koroziniam atsparumui.
5. Ištirti dangų atsparumą esant sausosios, šlapiosios ir slydimo trinties sąlygoms.

Elektrolankinio purškimo dangų gavimo metodika, darbe taikomi tyrimo metodai ir medžiagos

Eksperimentinio tyrimo metodika sudaryta siekiant išsiaiškinti dangų, gautų taikant naujas eksperimentines vielas, turinčių skirtingą cheminį užpildą, atsparumą įvairių rūšių trinčiams, mechaninėms ir fizikinėms savybėms. Bendradarbiaujant Vilniaus Gedimino technikos universiteto ir Vokietijos vielų gamintojo „Drahtzug Stein“ atstovams sukurtos keturios naujos eksperimentinės vielos. Parinkti purškimo procesų parametrai, leidžiantys gauti geros kokybės dangų struktūras, purškiant naujomis vielomis. Tyrimų metu ištirtos gautų dangų mikrostruktūros, tampumo modulis, atlikti kietumo, dangų atsparumo trinčiams bandymai (sausoji, šlapioji, slydimo trintis), potenciodinaminiai korozijos matavimai. Nustatytas dangų adhezijos stipris. Ištirta dangų adhezija ir kohezija.

Skyriaus tematika paskelbti 3 autoriaus straipsniai (Gargasas *et al.* 2011; Gargasas *et al.* 2013a; Gargasas *et al.* 2014a).

2.1. Medžiagų kūrimas

Purškimo medžiagos. Bendrų tyrimų tarp Vilniaus Gedimino technikos universiteto ir Vokietijos didžiausios suvirinimo ir terminio purškimo vielų gamybos kompanijos „Drahtzug Stein“ metu sukurtos ir pagamintos keturios skirtingos cheminės sudėties eksperimentinės miltelinės terminio purškimo vielos. Visų vielų pagrindą sudarė geležis. Pasirinktos ir išbandytos Mn-Cr-Mo-Ni, Mn-Cr-Mo ir Mn-Cr legiravimo sistemos. Šiuo darbu siekta sukurti naujas miltelines vielas, kurios pakeistų pramonėje naudojamas ekonomiškai mažiau rentabilias vielas. Svarbiausia sukurtų vielų paskirtis – formuoti įvairių rūšių trinčiai atsparias dangas, pasižyminčias gera adhezija su substratu, atsparumu korozijai bei geromis mechaninėmis savybėmis.

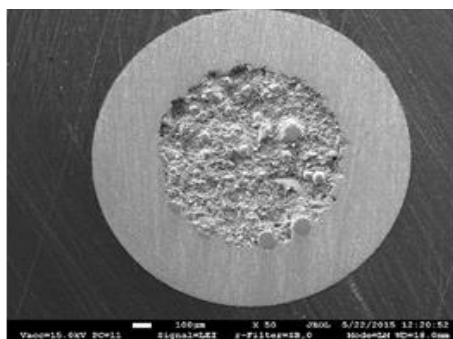
Tyrimams pagamintos 1,6 mm skersmens miltelinės vielos. Šio skersmens vielos dažniausiai naudojamos mechanizuotam aplydymui ir purškimui. Naujų vielų kūrimo proceso metu buvo išmėginta daugelis įvairių cheminių elementų sudedamųjų dalių variacijų. Atlikus išsamią rinkos analizę, Vokietijos „Drahtzug Stein“ gamykloje pagamintos miltelinės vielos su Mn-Cr-Mo-Ni, Mn-Cr-Mo, Mn-Cr legiruojančiaisiais elementais. Elementų procentinė išraiška pateikta 2.1 lentelėje. Šie legiruojuojantieji elementai pasirinkti todėl, kad chromas padidina kietumą, atsparumą nusidėvėjimui, korozijai. Manganas padidina stiprumo ribą tempiant, kietumą, atsparumą nusidėvėjimui, sumažina smūginį tįsumą. Nikelio elementai padidina stiprumo ribą tempiant, smūginį tįsumą, formuojamai dangai suteikia klampumo. Silicis dangose padidina elastingumą, stiprumo ribą tempiant, sumažina smūginį tįsumą ir santykinę ištįsimą. Molibdeno įtaka dangoms keleriopa: padidina tįsumą, atsparumą karščiui, dangos pasižymi didesniu atsparumu trapumui ir lūžimui po atleidimo, pagerina dangų apdirbamumą. Visi šie legiruojuojantieji elementai pagerina dangų grūdinamumą ir savigrūdą. Anglis suteikia atsparumą tempimui ir padidina dangos kietumą bei pagerina atsparumą trinčiai.

2.1 lentelė. Cheminė miltelinių vielų sudėtis

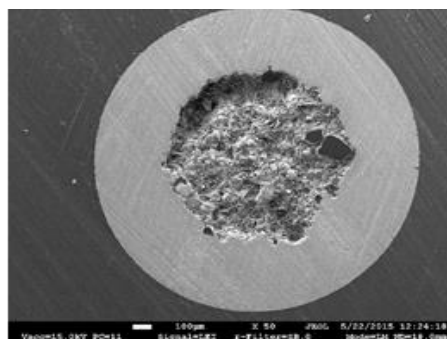
Table 2.1. Chemical composition of cored wires

Vielos legiravimo sistema	Cheminė sudėtis (%), likusi dalis Fe					
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni
Fe-Mn-Cr-Mo	0,5	1,5	0,6	6,0	0,5	-
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni	0,5	1,1	0,3	0,3	4,8	1,5
Fe-Mn-Cr	1,3	0,8	1,4	6,5	-	-
Fe-Mn-Cr (22,61 %)	2,0	0,8	0,26	22,61	-	-

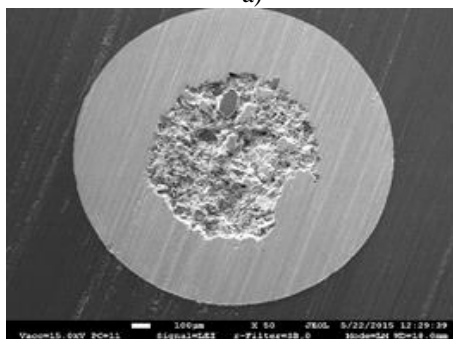
Vielų apvalkalai pagaminti iš suvirinto aukštu dažniu plieninio vamzdelio. 1 cm skersmens vamzdelis užpildomas legiruojančiųjų elementų ir anglies užpildu, valcuojamas ir traukiamas per trauktuves, kol gaunama 1,6 mm skersmens viela. Miltelinės vielos sienelių storis – nuo 350 iki 420 μm . Pagamintų eksperimentinių vielų nuotraukos pateikiamos 2.1 paveiksle. Išanalizavus SEM nuotraukas (2.1 pav.), galima teigti, jog užpildo medžiagoje esančios dalelės yra nevienodo dydžio, netaisyklingos ir nesimetriškos formos. Legiruojančiųjų dalelių dydis kinta nuo kelių μm iki 150 μm . Nuotraukose matomos medžiagų dalelės rodo, kokio dydžio ir formos galima tikėtis neišsilydžiusių dalelių užpurkštoje dangoje, jei tolimesniuose dangų mikrostruktūrų tyrimuose paaiškės, jog ne visos vieloje esančios dalelės išsilydo ir pasiekia dengiamąjį substratą skystos būsenos.



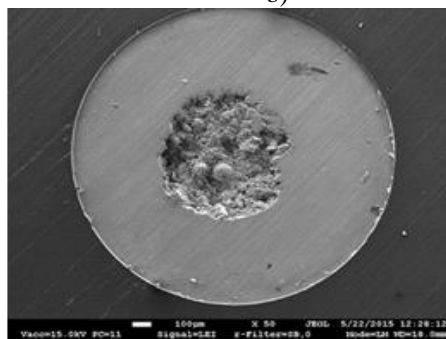
a)



b)



c)



d)

2.1 pav. Pagamintų vielų vaizdas ir plieninių sienelių storis: a) Fe-Mn-Cr-Mo viela.

Sienelių storis $\approx 350 \mu\text{m}$; b) Fe-Mn-Cr-Mo-Ni viela. Sienelių storis $\approx 360 \mu\text{m}$;
c) Fe-Mn-Cr viela. Sienelių storis $\approx 420 \mu\text{m}$; d) Fe-Mn-Cr (22,61 %) viela. Sienelių storis $\approx 420 \mu\text{m}$

Fig. 2.1. The view of the thermal arc spray wires and the thickness of the steel wall:

a) Fe-Mn-Cr-Mo wire. The wall thickness $\approx 350 \mu\text{m}$; b) Fe-Mn-Cr-Mo- wire. The wall thickness $\approx 360 \mu\text{m}$;
c) Fe-Mn-Cr wire. The wall thickness $\approx 420 \mu\text{m}$;
d) Fe-Mn-Cr (22.61 %) wire. The wall thickness $\approx 420 \mu\text{m}$

2.2. Purškimo įranga ir purškimo parametrai

Eksperimentinės dangos užpurkštos Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Medžiagotyros ir suvirinimo katedros, Dangų inžinerijos mokslinėje laboratorijoje, bei pakartotinai purškimo bandymai atlikti Prancūzijoje, Belforo-Monbeljaro technologijos universitete. Purškimai atlikti naudojant modifikuotą purškimo stendą „Castolin Eutectic EuTronic Arc“. Stendo nuotraukos pateiktos 2.2 paveiksle. Purškimų metu naudotas „EuTronic Arc Spray Gun 4“ pistoletas su 7 mm skersmens vidine kiauryme. Pistoletu nuotrauka pateikta 2.3 paveiksle. Lanko maitinimo šaltinis naudotas norint pasiekti didesnes purškimo sroves, kadangi maksimali purškimo stendo „Castolin Eutectic EuTronic Arc“ srovė yra 350 A.



2.2 pav. Tyrimams naudotas modifikuotas terminio purškimo stendas
Fig. 2.2. The modified equipment used for the thermal arc spraying experiments



2.3 pav. Purškimo metu naudotas pistoletas su 7 mm skersmens purškimo tūta
Fig. 2.3. The spraying gun with 7 mm diameter nozzle

Eksperimentų metu buvo naudojamos srovės iki 380 A, naudoti didesnes purškimo sroves 1,6 mm vielai netikslinga, kadangi procesas tampa nestabilus, gaunamos dangos su itin dideliu porėtumu (daugiau nei 50 %) bei dideliais paviršiniais defektais. Purškimo metu taikyti sinergetiniai režimai leido užtikrinti nepertraukiamą ir stabilų lanko degimą tarp dviejų miltelinių vielų. Sinergetiniai režimai nulemia elektros lanko, įtampos ir vielos tiekimo greičio suderinamumą, kuris užtikrina purškimo proceso stabilumą. Elektros lanko išlydytoms dalelėms pernešti naudotas suslėgtas 5 MPa, nusaustas oras. Suslėgtas oras pasirinktas dėl ekonominių sumetimų ir praktiškumo, kadangi naudojant inertines dujas elektrolankinis purškimas nėra konkurencingas lyginant su kitais terminio purškimo būdais. Pirminiame etape išbandyti įvairūs purškimo režimai, kurie leistų gauti dangas su geromis mechaninėmis bei fizikinėmis savybėmis. Pirminių eksperimentų metu nustatyti vielos tiekimo greičio, įtampos ir srovės parametrai, kuriems esant gaunamas stabilus elektros lankas esant 5 MPa slėgiui. Vėlesni tyrimai atlikti su 3 skirtingais purškimo režimais, kurių metu pakeista elektros lanko srovė prie jos priderinant įtampą ir sinergetinius režimus.

2.2 lentelė. Elektrolankinio purškimo parametrai

Table 2.2. Parameters for the thermal arc spraying

Vielų legiravimo sistema	Srovė, A (-3 +7 A)	Įtampa, V (±1)
Fe-Mn-Cr-Mo	320	31
	350	34
	380	32
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni	320	31
	350	36
	380	38
Fe-Mn-Cr	320	30
	350	36
	380	33
Fe-Mn-Cr (22,61 %)	320	30
	350	32
	380	32

Dangų užpurškimas atliktas rankiniu būdu ant substratų, kurie pritvirtinti prie besisukančio veleno išlaikant 170–190 mm purškimo atstumą tarp purškimo pistoleto ir dangos. Terminis elektrolankinis dangų purškimas atliktas vadovaujantis

LST EN ISO 14922-1:2001 „Terminis užpurškimas. Terminiškai užpurkštų gaminių kokybės reikalavimai. 1 dalis. Parinkimo ir naudojimo vadovas (ISO 14922-1:1999)“ standartu. Purškimo metu lanko ilgis tarp dviejų miltelinių vielų nuolat kinta (išlydomi ir išpučiami dujų srautu smulkūs metalo lašeliai), srovės (A) ir įtampos (U) reikšmės kinta. Purškimo proceso metu pastebėtas srovės nestabilumas ($-3 + 7$ A), o įtampos reikšmės kito (± 1 V), jas žiūrėti 2.2 lentelėje.

2.3. Eksperimentinio tyrimo metodika

Darbe atlikti kompleksiniai užpurkštų dangų tyrimai. Jų metu:

- analizuota užpurkštų dangų makro ir mikrostruktūra, nustatytas porėtumo ir oksidų procentinis kiekis ir cheminė sudėtis bei skirtingos fazės;
- atlikti dangų adhezijos, mikrokietumo ir tamprumo modulio nustatymo bandymai;
- ištirtos tribologinės dangų savybės;
- atlikti koroziniai tyrimai.

2.3.1. Substrato paruošimas

Substrato paruošimas. Substratui parinktas S235 JR markės karštai valcuotas neanglingasis plienas. Plieno cheminė sudėtis pateikta 2.3 lentelėje. Karštai valcuoto 2 mm storio konstrukcinio plieno S235 JR lakštai mechaniškai sukarpyti į 150×26 mm plokšteles. Substrato paviršius kruopščiai nuvalytas ir paruoštas purškimui remiantis literatūros analize ir nurodymais, pateiktais pagal LST EN 13507 „Terminis purškimas. Metalinių dalių ir komponentų, skirtų terminiam purškimui, paviršių parengiamasis apdorojimas“ standartą. Nuo bandinių paviršiaus su tirpikliu nuvalyti riebalai ir purvas. Mechaniškai valyta smėliavimo kameroje, naudojant aliuminio oksidą, kurio grūdėtumas F24, taip suteikiant substrato paviršiui reikiamą paviršiaus šiurkštumą prieš purškimą ir pašalinant plieno paviršiaus oksidinę plėvelę, kuri būdinga karštai valcuotiems plienams.

2.3 lentelė. Plieno substrato cheminė sudėtis, masės % (LST EN 10025-2:2004)

Table 2.3. Chemical composition in wt.% of the steel substrate (LST EN 10025-2:2004)

Plieno markė	C	Mn	P	S	N	Cu	Fe
S235JR	0,17	1,40	0,040	0,040	0,012	0,55	likęs

2.3.2. Optinė mikroskopija

Optinės mikroskopijos tyrimai atlikti optiniu metalografiniu mikroskopu „Olympus BXS“, aprūpintu integruota vaizdo kamera ir programiniu duomenų apdorojimo paketu. Struktūra tirta naudojant 25 ir 100 kartų didinimą.

Bandiniai optinei mikroskopijai paruošti juos įpresavus į formas, šlifuojant ir poliruojant. Paskutinis poliravimo etapas atliktas su skysta poliravimo priemone „Reflex concept LDM“, kurios grūdėtumas 1/0 μm . Kai bandinių plokštumos įgijo veidrodinį blizgesį, šlifai plauti etilo alkoholio tirpalu ir džiovinti karšto oro srove. Dangų struktūra buvo tirama po poliravimo ir po ėsdinimo. Ėsdinimui panaudotas HNO_3 – HF tirpalas. Šis cheminis reaktyvas nevienodai intensyviai reaguoja su dangos struktūros grūdeliais ir jų ribomis, kurių struktūrinės komponentės yra skirtingos. Apšviečiant ėsdintą mikrošlifo plokštumą, ne taip stipriai išėsdintos struktūrinės komponentės atspindi daugiau šviesos spindulių nuo tiriamojo paviršiaus, todėl mikroskopo regos lauke yra šviesios; giliau išdėstytos struktūros detalės atspindi mažiau šviesos spindulių ir mikroskopo regos lauke yra tamsios.

Po ėsdinimo poliruoti paviršiai pasidaro matiniai, baigus ėsdinti, šlifai nuplauti etilo alkoholio tirpalu ir džiovinti karšto oro srove.

2.3.3. Nuskaitančioji elektroninė mikroskopija

Nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) tyrimai atlikti Vokietijos Chemnico technikos universitete, Mechanikos fakultete, Medžiagų inžinerijos institute, mokslinės stažuotės metu. Tyrimai atlikti su SEM EDAX nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos prietaisu.

Elektrolankiniu būdu užpurkštos dangos tirtos SEM būdu antrinių elektronų signalu, skenuojant bandinio paviršių elektronų pluoštelio. Bandinių paviršius chemiškai nuvalytas, norint pašalinti įvairius paviršiaus teršalus po šlifavimo ir poliravimo. Vakuuminio garinimo būdu bandiniai padengti 40 nm storio anglies pluošto plėvele, norint padidinti elektrinį dangų laidumą, garinant anglies elektrodą 30 min. Bandymų parametrai: 25 kV greitinančioji įtampa, 45 μA emisijos srovė ir 16 mm atstumu iki bandinio paviršiaus. Naudotas didinimas nuo 25 X iki 2,00 kX, temperatūra 22 $^{\circ}\text{C}$.

2.3.4. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė

Fazinė elektrolankinio purškimo dangų analizė atlikta naudojant rentgeno spindulių difraktometrą „SmartLab (Rigaku)“ su 9 kW besisukančio Cu anodo rentgeno spindulių vamzdžiu. Rentgeno spindulys į bandinio paviršių krito 0,5 laipsnio kampų, difrakcijos kampo 2θ intervalas: 15–80 $^{\circ}$; nuskaitymo žingsnis – 0,02 $^{\circ}$, detektoriaus judėjimo greitis 1 $^{\circ}/\text{min.}$, temperatūra 25 $^{\circ}\text{C}$.

Analizės rezultatai pateikiami rentgenogramose – kreivėse, kuriose pavaizduotos atspindėjusių rentgeno spindulių intensyvumo priklausomybės nuo detektoriaus kampo. Fazijų identifikavimas atliktas dešifruojant rentgenogramas su atitinkama programine įranga.

2.3.5. Išlydytų fakelo dalelių analizė

Atliekant terminio purškimo tyrimo darbus su modifikuota terminio purškimo įranga, buvo vertinama purškimo fakele skriejančių dalelių dydžio įvairovė. Šiam tikslui buvo parinkta dalelių surinkimo metodika.

Po terminio elektrolankinio purškimo pistoletu buvo pastatoma talpa su ledu. Nuo ledo paviršiaus iki purškimo pistoleto tūtos galo buvo nustatytas 170–190 mm atstumas, t. y. atstumas, kuris eksperimentų metu buvo palaikomas tarp pistoleto tūtos ir besisukančių bandinių paviršiaus. Nepriklausomai nuo purškimo parametrų, purškimo laikas buvo 10 sekundžių. Vėliau ištirpusio ledo vanduo buvo filtruojamas, taip surenkant talpoje esančias daleles.

Surinktos kietos dalelės terminio elektrolankinio purškimo metu yra fakele skriejantys skysti metalo lašeliai, kurie prieš susidūrimą su substratu patenka į aušinimo terpę, kristalizuojasi, tačiau nesubliūkšta. Surinktos dalelės vėliau analizuojamos SEM mikroskopu.

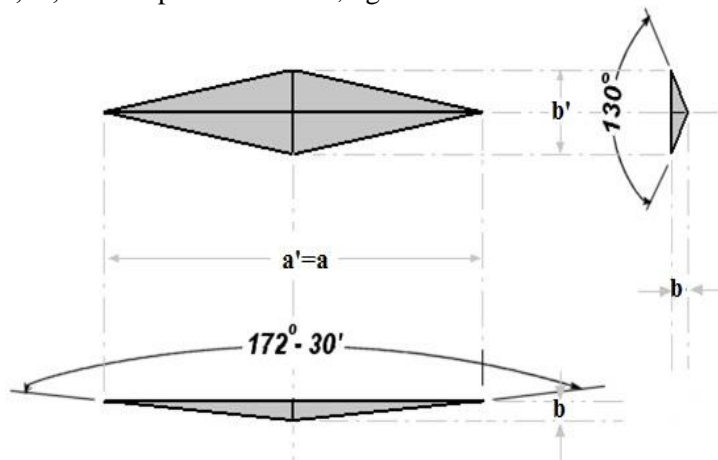
2.3.6. Mikrokietumo ir dangos tamprumo modulio matavimai

Dangų mikrokietumo matavimai atlikti poliruotuose mikrošlifų paviršiuose su „Zwick Roell ZHμ“ mikrokietmačiu, kurio matavimo paklaida 1 %. Matavimai atlikti naudojant 100 g ir 300 g apkrovas ir išlaikant jas 10 s. Kiekviename bandinyje atlikta po 10 matavimų. Naudojant 100 g apkrovą, tirtas atskirų dangos lamelių mikrokietumas taip išmatuojant konkretaus susiformavusio dangos lašelio mikrokietumą. Naudojant 300 g apkrovą išmatuotas dangos mikrokietumas.

Tiriant dangų tamprumo modulį, atsižvelgta į tai, jog matavimų metu aplink indentorių susidaro tampriųjų ir plastinių deformacijų zonos. Matuojant indentoriaus padarytą deformaciją, matuojamas kietumas, o naudojantis kietumo matavimu, apskaičiuojamas tamprumo modulis (žr. 2.4 pav.). Knopo indentoriaus įspaudo rombo įstrižainės yra skirtingos. Jų proporcijas nulemia indentoriaus geometrija. Įstrižainių ilgių santykis $b' / a' = 0,14$. Nuėmus apkrovą, tampriosios deformacijos sumažina įstrižainių įspaudų ilgius, bet didžiosios įstrižainės ilgio pokytis yra nežymus, todėl priimama, kad $a \cong a'$. Tamprumo modulis E apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{b}{a} \cong \frac{b'}{a'} = \frac{b'}{a} - \frac{\alpha Hk}{E}, \quad (2.1)$$

čia a – didžioji įspaudo rombo įstrižainė, μm ; b – mažoji įspaudo rombo įstrižainė, μm ; a' ; b' – didžiosios ir mažosios indentoriaus įstrižainių ilgiai, μm ; α – konstanta; $\alpha = 0,45$; E – tamprumo modulis, kg/mm^2 .



2.4 pav. Knopo indentoriaus įspaudo geometrija
Fig. 2.4. The mark of the Knoop indenter

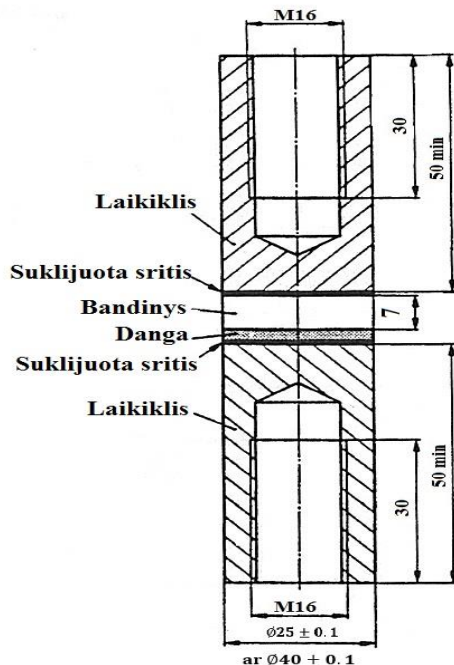
Tamprumo modulis dangose išmatuotas statmena ir vertikalia pozicija pagrindo atžvilgiu. Matavimai atlikti spaudžiant indentorių 1,961 N jėga. Indentoriaus išlaikymo laikas 10 s. Kiekvieno matavimo metu atlikta po 15 matavimų, iš kurių išbrauktos mažiausia ir didžiausia reikšmė. Šios reikšmės panaikintos siekiant išvengti duomenų netikslumo. Visi dangų kietumo matavimai atlikti remiantis LST EN ISO 4516:2002 „Metalinės ir kitos neorganinės dangos. Vikerso ir Knopo mikrokietumo bandymai“ standartu. Darbe pateikiami aritmetiniai dangų kietumo ir tamprumo modulio vidurkiai su standartiniu nuokrypiu σ , kuris apskaičiuojamas remiantis formule:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.2)$$

čia x_i yra i -tojo matavimo metu gautoji reikšmė; \bar{x} yra imties vidurkis; n – imties dydis.

2.3.7. Dangų adhezijos tyrimai

Dangos sukibimo su pagrindu stiprumas yra vienas iš pagrindinių kriterijų, kuris lemia, ar danga atitinka keliamus eksploatacinius reikalavimus. Dangų adhezijos tyrimai atlikti vadovaujantis standartu LST EN 582:2001 „Terminis užpurškimas. Tempiamojo adhezijos stiprio nustatymas“ Vilniaus Gedimino technikos universitete, naudojant statinio tempimo mašiną „TIRA test 2300“. Prie užpurkštų tablečių formos bandinių iš abiejų pusių, naudojant epoksidinius dvikomponenčius klijus EDP, buvo klijuojami 25 mm skersmens ir 50 cm ilgio strypeliai (žr. 2.5 pav.). Klijuojamieji paviršiai nuvalyti ir nusiūti (išskyrus dangos paviršių). Suklijuoti bandiniai specialiame stende centruojami ir paliekami 24 valandoms, kambario temperatūroje, kad įvyktų klijų polimerizacija.



2.5 pav. Bandinių paruošimas adhezijos bandymams

Fig. 2.5. Preparation of samples for testing adhesion

Klijams sukietėjus bandiniai buvo statomi į tempimo mašiną ir nutraukiami 1000 ± 100 N/s greičiu. Vėliau gautieji duomenys apdorojami ir apskaičiuojamos dangų adhezijos arba kohezijos skaitinės reikšmės. Dangų stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_h = \frac{F}{S}, \quad (2.3)$$

čia R_h – dangų stipris (adhezija), Pa; F – bandymo metu užfiksuota maksimali jėga, kuriai esant danga nutrūko, N; S – bandomojo paviršiaus plotas, mm².

2.3.8. Dangų paviršiaus šiurkščio matavimas

Dangų paviršiaus šiurkščio matavimai atlikti „Hommelwerke LV-50 E“ šiurkščio matuokliu dangų paviršiuose, jų nevalant ar kitaip mechaniškai ar fiziškai neapdorojant. Darbe išmatuotos ir palygintos R_a – vidutinio profilio nukrypimo, reikšmės ir jų vidurkiai. Bandymų metu kiekvienai danga atlikta po dešimt matavimų. Gauti duomenys apdoroti programiniu paketu T8000.

2.3.9. Porėtumo ir oksidų kiekio nustatymas

Užpurkštoje dangoje įvairaus pavidalo ir dydžio tuštumos – poros ir dalelės, sureagavusios su deguonimi ir sudariusios oksidus dangoje, nustatytos iš optiniu metalografiniu mikroskopu gautų nuotraukų, naudojant programinį paketą „Scion Image“. O gautieji duomenys apdoroti „Microsoft Excel“ programiniu paketu.

2.3.10. Dangų tribologiniai tyrimai ir paviršinė dangų 3D profilometrija

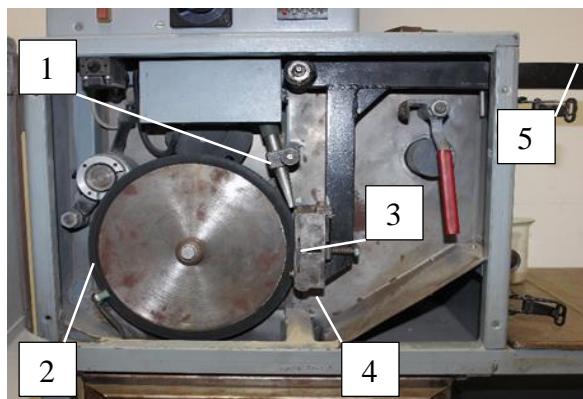
Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų atsparumas trinčiai buvo vertintas atliekant trijų skirtingų rūšių (sausosios, šlapiosios ir slydimo) trinties bandymus. Šie trys bandymai svarbūs tuo, jog jais laboratorijoje imituojamos realios aplinkos sąlygos, kurioms esant eksploatuojamos dangos.

Tribologiniai bandymai atlikti Vokietijos Chemnico technikos universitete, Mechanikos fakultete, Medžiagų inžinerijos institute. Sausosios trinties bandymai atlikti pagal ASTM G65-04 standartą. Tyrimo esmė – besisukantis guminis diskas su 130 N apkrova liečiamas į substratą su danga. Sausas kvarcinis smėlis tiekiamas tarp besisukančio guminio disko ir bandinio su danga. Parenkamos trinties procedūros iš 2.4 lentelės. Abrazyvinio dilimo bandymo schema pateikta 2.6 paveiksle.

2.4 lentelė. Sausosios trinties ciklai pagal ASTM G65-04 standartą

Table 2.4. The cycles of the wet friction by ASTM G65-04 standart

Specifikuota procedūra	Dangos paviršių veikianti jėga, N	Disko apsisukimų skaičius	Nueitas linijinis kelias, m
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718



2.6 pav. Abrazyvinio dilimo bandymo (pagal ASTM G65-04) įrenginio schema:

- 1 – abrazyvo tiekimo mechanizmas; 2 – guma dengtas ratas; 3 – bandinys;
4 – bandinio laikiklis; 5 – apkrova

Fig. 2.6. The principle scheme of the abrasion (ASTM G65 – 04) test machine:

- 1 – abrasive delivery mechanism; 2 – rubber coated wheel; 3 – the example;
4 – the sample holder; 5 – load

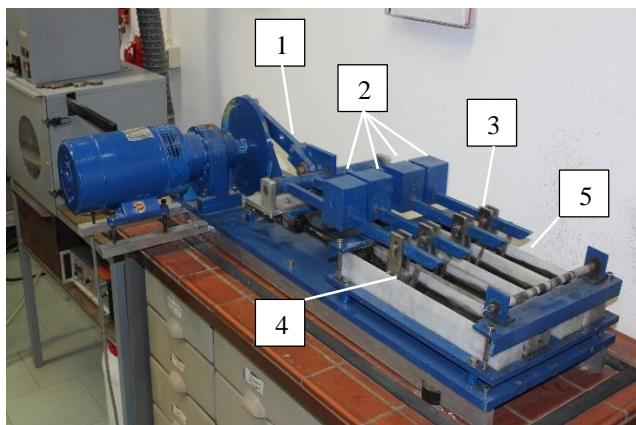
Kitame etape bandiniai sveriami ir lyginamas dangos svorio netekimas per tam tikro laiko ir nueito kelio santykį. Dilimo bandymo metu nustatytas dangų praradimo kiekis pateikiamas kaip tūrinis praradimas, kuris matuojamas mm^3 , arba kaip svorio netekimas, matuojamas gramais arba miligramais. Nustatant dangos tūrio praradimą paviršiuose taikytos formulės 2.4–2.5 pagal ASTM G65-04 standartą:

$$\text{svorio netekimas, mm}^3 = \frac{\text{svorio netekimas (g)}}{\text{tiriamo paviršiaus tankis} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)} \times 1000, \quad (2.4)$$

Kai nežinomas tikslus dangos tankis, matuojamas dangos svorio netekimas atskiro ciklinio bandymo metu:

$$\text{svorio netekimas (mg)} = \left(\frac{\text{tirtio bandinio svoris prieš eksperimentą, g}}{\text{bandinio svoris po eksperimento, g}} \right) / 1000, \quad (2.5)$$

Šlapiosios trinties dangų tribologinės savybės įvertintos atliekant bandymus pagal ASTM G75-07 standartą (Šlapiosios trinties bandymai (Milerio indekso skaičiaus) nustatymas). Paruošti 25×12 mm bandiniai. Prieš eksperimentą bandiniai valomi 30 min. ultragarsu etilo alkoholio vonelėje. Bandymo metu naudotas elektrokorundas „WEISS F220“ ir distiliuotas vanduo. Eksperimento metu bandiniai sudėti į specialius laikiklius ir, veikiami pastovia 22,24 N jėga, cikliška trinti į guminį pagrindą su korundo ir vandens mišiniu, taip imituojant šlapiąją trintį. Dilimo testo schema pateikta 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Milerio dilimo bandymo (pagal ASTM G75-07) įrenginio schema:

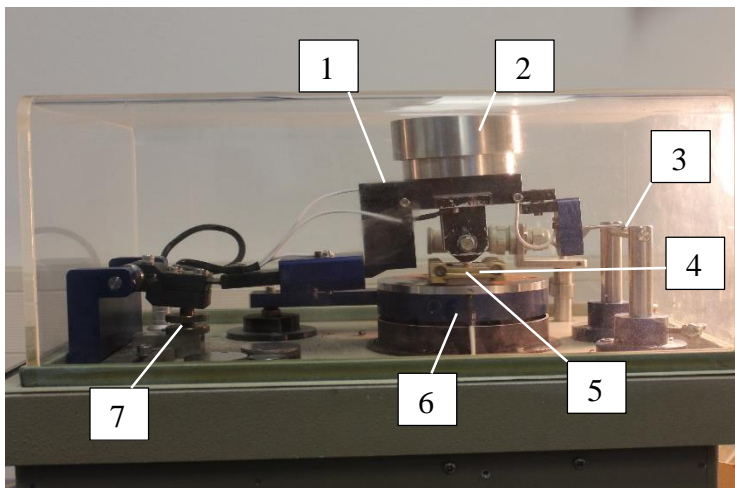
1 – slenkamasis sukimosi petys; 2 – apkrova; 3 – bandinių laikiklis;

4 – plastikinis dėklas; 5 – abrazyvo ir distiliuoto vandens terpė

Fig. 2.7. The principle scheme of Miller's wear (ASTM G75-07) test machine: 1 – pivoted reciprocating arm; 2 – dead weight; 3 – sample holder; 4 – molded plastic tray; 5 – sand slurry and distilled water medium

Bandiniai abrazyvo veikiami keturis kartus po 2 valandas. Praėjus dviem valandoms po bandymo, bandiniai išimami, nuvalomi ultragarsu etilo alkoholio vonelėje, pasveriami ir registruojamas svorio netekimas. Vėl tvirtinami į įrenginį, apskant 90° kampu, ir testuojami dar dvi valandas. Po dviejų testavimo valandų atliekama analogiška procedūra. Atlikus bandymus skaičiuojamas dangos svorio netekimas per 8 valandas, taip sužinant dangos atsparumą šlapiajai trinčiai.

Tribologiniai slydimo–trinties bandymai atlikti specialiu įrenginiu „Tribometer SVT 40“, generuojančiu tam tikro dydžio virpesius, kurie judina bandinį su kietu indentoriumi, sukeldami paviršinį dangos irimą. Tiriamasis dangos paviršius vienoje vietoje veikiamas pastovia 22 N apkrova ir kietuoju kūnu, testuojamas 1 valandą. Bandymai atlikti su grūdintu indentoriumi, kurio mikrokietumas 820 HV 0,3 (standartinis nuokrypis 2 %), skersmuo 10 mm, ir Al_2O_3 – keraminiu indentoriumi, kurio kietumas 1310 HV 0,3 (standartinis nuokrypis 2 %), skersmuo 9 mm. Bandymai atlikti kontroliuojamoje atmosferoje, išlaikant santykinę 45–50 % oro drėgmę. Bandymų temperatūra 21 °C. Slydimo trinties bandymo schema pateikta 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Slydimo trinties įrenginio schema: 1 – indentoriaus laikiklis; 2 – apkrova; 3 – virpesių registratorius; 4 – tiriamasis bandinys; 5 – indentorius; 6 – rotacinis-vibracinis pagrindas; 7 – variklis

Fig. 2.8. The scheme of the sliding test machine: 1 – indenter holder; 2 – dead load; 3 – vibration registrar; 4 – testing specimen; 5 – indenter; 6 – rotational – vibrational base; 7 – engine

Norint eliminuoti pradinio paviršiaus šiurkštumo įtaką slydimo trinties ir 3D profilometrijos bandymo rezultatams, tiriamųjų dangų paviršiai prieš eksperimentą buvo šlifuojami abrazyvinėmis medžiagomis, kurių šiurkštumas P200, siekiant pašalinti paviršiaus nelygumus, ir valomi ultragarsinėje vonelėje, pašalinant abrazyvo likučius iš paviršinių dangos sluoksnių.

Bandinys su nušlifuotu dangos paviršiumi įtvirtinamas laikiklyje, kuris pastoviu greičiu vibruoja pasirinktą laiko tarpą. Bandymai atlikti visoms dangoms, parinkus vienos valandos trukmės intervalą.

Po atlikto eksperimento dangos paviršiuje išdilusios „duobutės“ matuojamos 3D profilometru, o gauti duomenys apdorojami „MikroCad“ programiniu paketu, išmatuojant tirtos įdubos gylį, plotį, skersmenį ir išdilusio paviršiaus vidinį šiurkštumą. Iš gautų rezultatų formuojamas tirtų dangų atsparumas kietiesiems kūnams. Taip pat matuojamas ir tiriamas nudilęs (grūdinto plieno ar keramikos) rutuliukas stereomikroskopu. Matuojamas paviršiaus nudilimas, forma ir skersmuo. Gauti duomenys apdorojami „ProImage“ programiniu paketu ir suformuluojamos išvados apie dangos atsparumą slydimo trinčiai.

2.3.11. Dangų korozinio atsparumo tyrimai

Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų korozinis atsparumas nustatytas atliekant potenciodinامينius poliarizacijos matavimus. Bandymai atlikti Ukrainos nacionaliniame Lvovo politechnikos universitete su potenciostatiniu/galvanostatiniu prietaisu. Elektrocheminiai dangų matavimai atlikti specialioje kameroje, kurioje patalpinta danga, etaloninė plokštelė ir pagalbinis elektrodas. Kaip etalonas buvo naudojamas gyvsidabrio chlorido elektrodas, panardintas į NaCl tirpalą. Atliekant matavimus kaip pagalbinis elektrodas pasirinkta platinos viela. Tyrimams naudotas 3,4 % NaCl tirpalas. Keičiant potencialą tarp elektrodų buvo gautos potenciodinaminės poliarizacijos kreivės NaCl tirpale.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Optinės, nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos ir rentgeno spindulių difrakcijos XRD analizės metodai leidžia ištirti geležies pagrindo vielų su Mn-Cr-Mo-Ni, Mn-Cr-Mo, Mn-Cr legiruojančiaisiais elementais struktūrų ypatumus priklausomai nuo technologinių purškimo parametrų.
2. Mikrokietumo ir tamprumo modulio matavimai, antikorozinės-potenciodinaminės poliarizacijos tyrimai, paviršiaus šiurkščio, porėtumo ir oksidų kiekio nustatymas leidžia kokybiškai įvertinti legiravimo sistemų ypatumus.

3. Užpurkštų dangų fizikinėms ir mechaninėms savybėms nustatyti panaudoti standartiniai bandymų metodai pagal galiojančius JAV, Lietuvos ir Europos standartų reikalavimus. Dangų atsparumo trinčiai tyrimai atlikti panaudojus tris skirtingus metodus: šlapiosios, sausosios ir slydimo trinties.
4. Pasirinktas bandymų įrangos kompleksas leidžia įvairiapusiškai įvertinti naujų, eksperimentinių dangų eksploatacines savybes.

Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų savybių tyrimai ir analizė

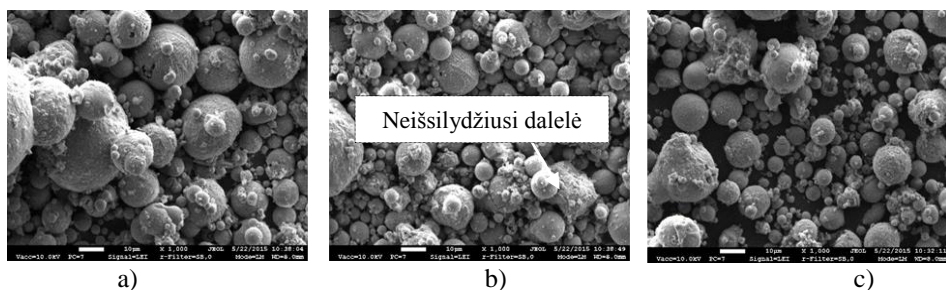
Skyriuje pateikiami ir analizuojami užpurkštų Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr ir Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangų sandaros ir mechaninių savybių tyrimo rezultatai. Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Gargasas *et al.* 2013a; Gargasas *et al.* 2013b; Gargasas *et al.* 2013c; Gargasas *et al.* 2014a; Gargasas *et al.* 2014b).

3.1. Surinktų fakelo dalelių analizė

Surinktų išlydytų dalelių mikroskopiniai tyrimai atlikti siekiant nustatyti jų formą, dydį, struktūrą bei sudėtį. Jie priklauso nuo pasirinkto purškimo režimo, kadangi šie išsilydžiusių dalelių parametrai turi įtakos dangų formavimuisi ant substrato. Surinktos dalelės analizuotos skenuojančiu elektroniniu mikroskopu. Išsilydžiusių dalelių SEM rezultatai pateikti 3.1–3.4 paveiksluose.

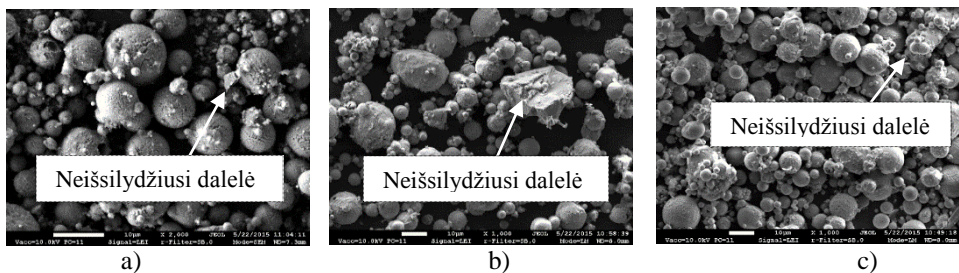
Dalelių granulometrijos tyrimais nustatyta, jog visų keturių išlydytų vielų dalelių forma panaši, tačiau skirtingų dydžių. Kai kurios dalelės netaisyklingos sferinės formos, kai kur aptinkama ir neišsilydžiusių dalelių. Iš SEM nuotraukų

matyti, jog dalelių formavimuisi įtakos turi taikomi purškimo parametrai. Naudojant mažas purškimo sroves (320 A) formuojami stambūs lašeliai, o didinant sroves jie smulkėja. Smulkiausi išlydyti lašeliai gaunami, esant 380 A srovei. Išlydytų dalelių skersmuo sumažėja vidutiniškai nuo 20,8 μm iki 9,2 μm . Skaitinės reikšmės pateiktos 3.1 lentelėje. Esant 20,8 μm vidutiniam dalelių dydžiui vidutinis lamelių aukštis siekia 5 μm , o ilgis 200 μm . Purškiamų dalelių dydžiui sumažėjus iki 9,2 μm lamelės aukštis vidutiniškai sumažėja iki 2 μm , o ilgis – iki 180 μm . Tiek naudojant mažas, tiek dideles purškimo sroves, išlydytų dalelių masėje pastebimos ir stambesnės, ir smulkesnės dalelės. Taip yra todėl, kad vieloje esantys legiruojantieji elementai lydosi skirtingais temperatūrų intervalais. Taip pat terminio purškimo vieloje esantis užpildas yra skirtingos granuliacijos. Tai nulemia išlydytų dalelių dydį dangoje.



3.1 pav. Vielos Fe-Mn-Cr-Mo išsilydę lašeliai: a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.1. Melted droplets of the Fe-Mn-Cr-Mo wire: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode



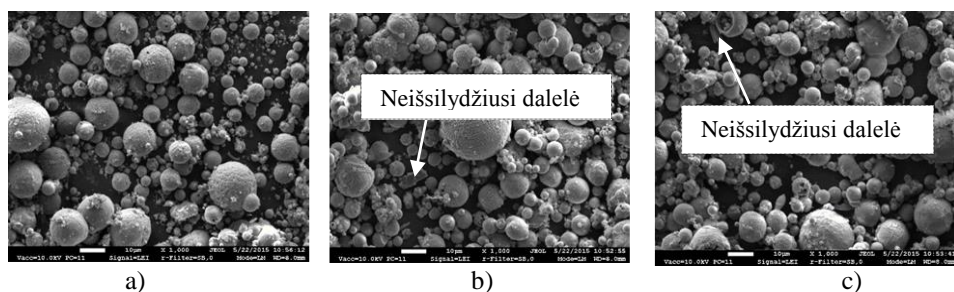
3.2 pav. Vielos Fe-Mn-Cr-Mo-Ni išsilydę lašeliai: a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.2. Melted droplets of the Fe-Mn-Cr-Mo-Ni wire: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode



3.3 pav. Viešos Fe-Mn-Cr išsilydę lašeliai: a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.3. Melted droplets of the Fe-Mn-Cr wire: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

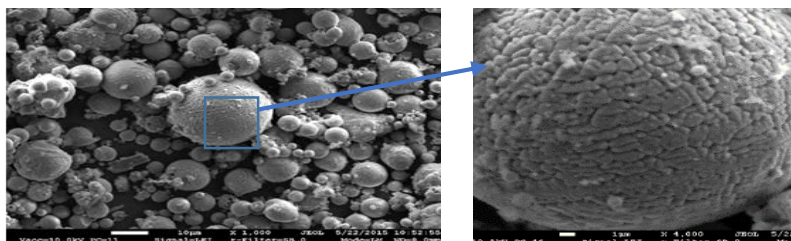


3.4 pav. Viešos Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) išsilydę lašeliai: a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.4. Melted droplets of the Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) wire: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

Iš nuotraukų matyti, jog tarp kai kurių išlydytų dalelių yra netaisyklingos formos neišsilydžiusių dalelių. Jų procentinis kiekis lyginant su išsilydžiusiomis dalelėmis labai nedidelis ir siekia iki 1 procento.

Naudojant didesnę didinimą visose dalelėse aptikta smulki pirminės kristalizacijos struktūra, susidariusi išlydytos dalelės paviršiuje (žr. 3.5 pav.).



3.5 pav. Dalelės paviršiuje susidariusi dendritinė pirminės kristalizacijos struktūra

Fig. 3.5. The dendritic structure of the primary crystallization on the particle layer

3.1 lentelė. Vidutinės skaitinės išlydytų dalelių skersmens reikšmės

Table 3.1. The average diameter values of the molten particle

Dalelių pa- parametrai	Elektrolankinio purškimo viela											
	Fe-Mn-Cr-Mo			Fe-Mn-Cr-Mo- Ni			Fe-Mn-Cr			Fe-Mn-Cr (22,61%)		
Purškimo srovė, A	320	350	380	320	350	380	320	350	380	320	350	380
Vidutinis dalelių skersmuo,	18,5	16,4	14,5	20,0	15,5	10,0	17,5	15,2	9,2	14,4	10,1	9,1
Neišsilydži- usių dalelių kiekis, %	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0
Vidutinis dalelių tūris, μm^3	3317	2308	1595	4187	1949	523	2805	1838	408	1563	539	394

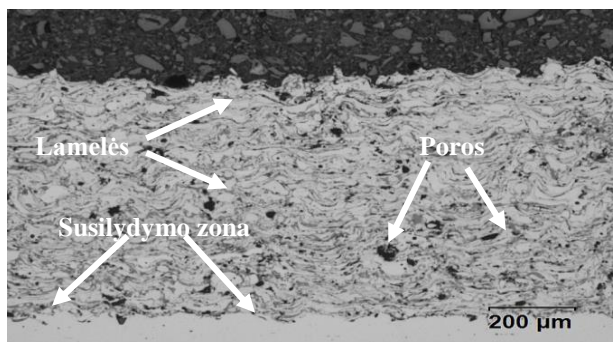
3.2. Dangų sandaros tyrimai

Užpurkštų dangų struktūra analizuota SEM, RMA ir optinės mikroskopijos metodais. Rezultatai pateikti 3.6–3.9 paveiksluose ir 3.2 lentelėje. Pateiktose skersinių mikrošlifų nuotraukose matyti lamelių ir porų išsidėstymas bei sąlyčio linija tarp dangos ir substrato. Prie jungiamosios dangos ir substrato linijos išsidėsčiusios porų samplaikos.

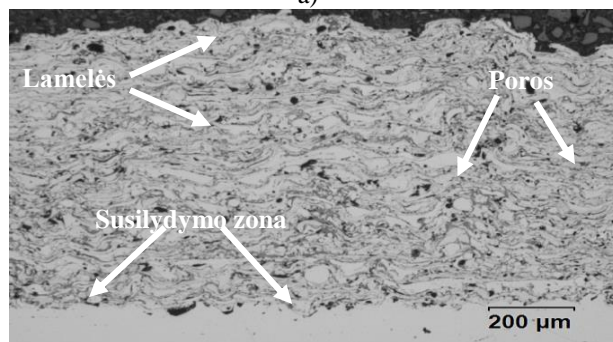
Dangos, užpurkštos naudojant 320 A srovės, turi panašią lamelių formą. Lamelės dangose ganėtinai stambios, aplink jas kai kur išsidėsčiusios tuštumos – poros. Lyginant su kitais purškimo režimais šio tipo dangose ganėtinai daug neišblūškusių dalelių, jos dangoje matomos apvalios formos, o kai kur juodos tuštumos – tai šlifavimo ar poliravimo metu išplėtos iš paviršiaus nesublūškusios dalelės.

Lyginant 3.6–3.9 paveiksluose pateiktas dangų nuotraukas matyti, jog purškimo parametų kaita turi didelę įtaką dangos lamelių formavimuisi. Didinant purškimo sroves nuo 320 A iki 380 A, lamelių morfologija dangose pradeda kisti, suformuojamos daug smulkesnės ir plonesnės lamelės. Ribų tarp išsilydžiusių dalelių susidarymą lemia tarpusavio sąveika formuojantis vienetiniam sluoksniui. Surinkta fakelo dalelių analizė (3.1 skyrius) parodė, kad purškiant miltelines vielas dalelės fakele yra nevienodos ir turi skirtingą plastinę deformaciją susidurimo

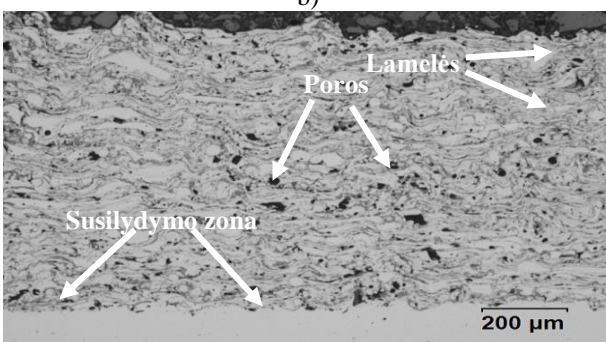
su paviršiumi metu. Skirtinga cheminė sudėtis ir struktūra apsunkina ryšių susidarymą tarp dalelių, todėl ribose tarp dalelių yra porų, kurios neleidžia tolygiai priglusti lamelėms viena prie kitos.



a)



b)



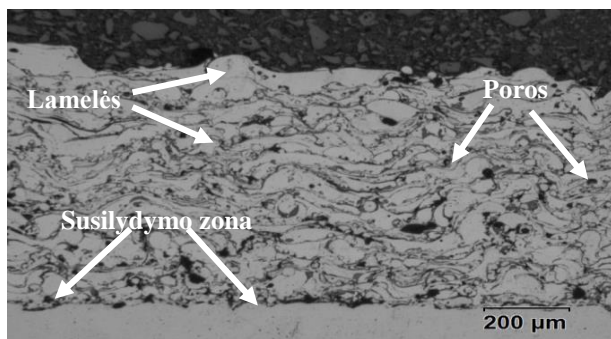
c)

3.6 pav. Fe-Mn-Cr-Mo dangų mikrostruktūros esant skirtingiems purškimo režimams:

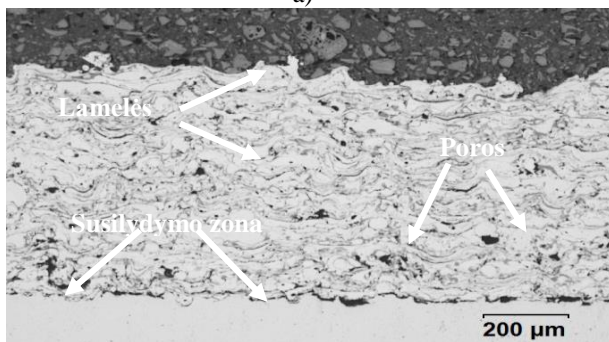
a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.6. Fe-Mn-Cr-Mo type coatings microstructure with different spraying modes:

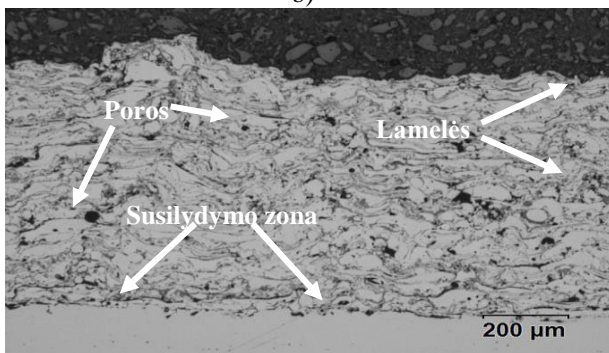
a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode



a)



b)

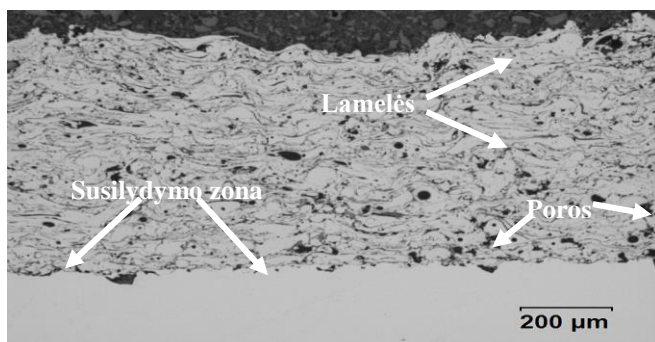


c)

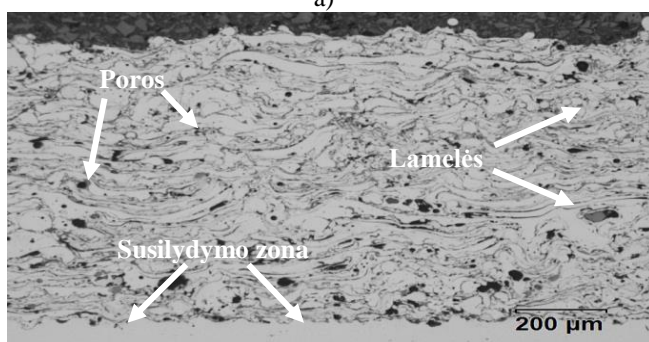
3.7 pav. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangų mikrostruktūros esant skirtingiems purškimo režimams: a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas
Fig. 3.7. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni type coatings microstructure with different spraying modes:
a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

Kai kurios dalelės jau pasiekia substratą susikristalizavusios ir atsitrėkusios į paviršių nesubliūkšta. Išlydytos vielos maži lašeliai greitai oksiduojasi ir dėl to,

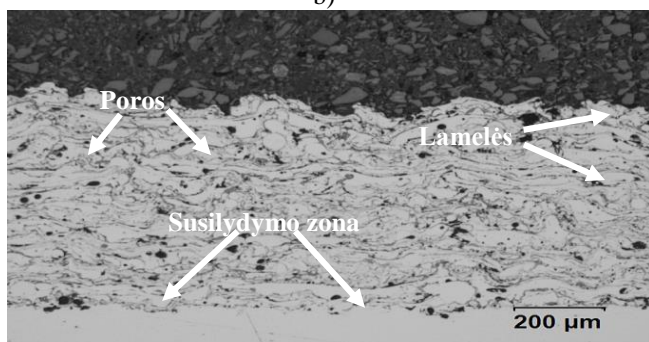
kad purškimo metu transportuojančios dujos yra suslėgtas oras. Purškiamos medžiagos dalelės, įkaitusios aukščiau lydimosi temperatūros, būdamos oro atmosferoje oksiduojasi. Judėjimo metu išlydytų skysto metalo dalelių paviršiuje susidaro oksidinės plėvelės, kurios pereina į formuojamą dangą.



a)



b)



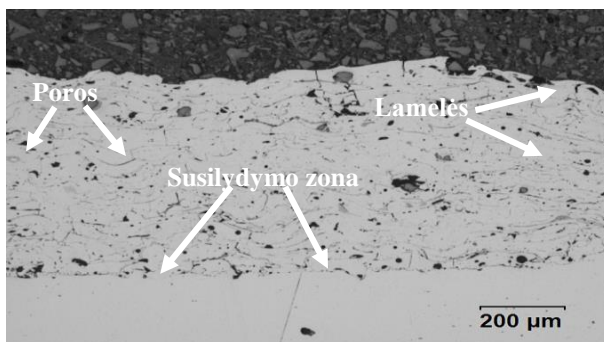
c)

3.8 pav. Fe-Mn-Cr dangų mikrostruktūros esant skirtingiems purškimo režimams:

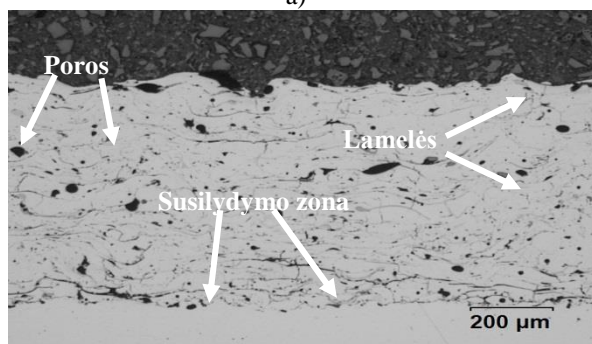
a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.8. Fe-Mn-Cr type coatings microstructure with different spraying modes:

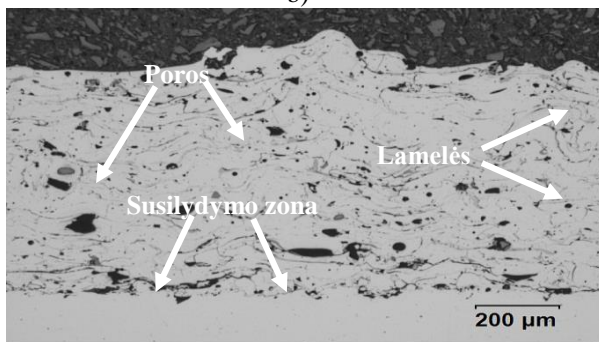
a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode



a)



b)



c)

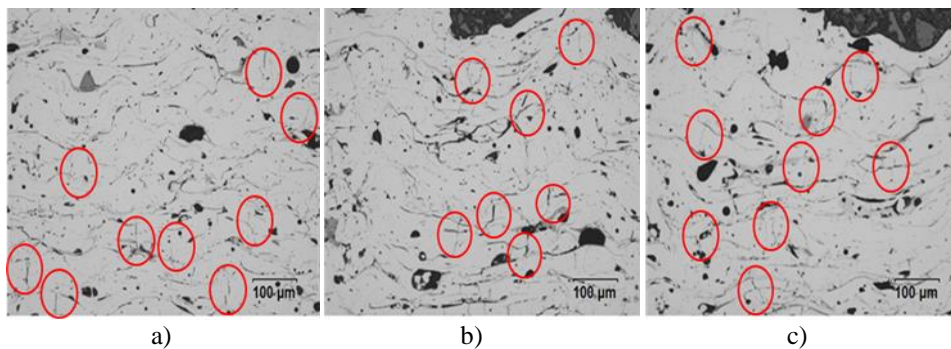
3.9 pav. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangų mikrostruktūros esant skirtingiems purškimo režimams: a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.9. Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) type coatings microstructure with different spraying modes: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

Tiriant sąlyčio liniją pastebėta, kad riboje tarp pagrindinio metalo ir dangos ryšiai susidaro dėl mechaninės sąveikos ir pagrindinio metalo mikronelygumų susilydymo. Analizuojant pagrindinio metalo ir dangos sąlyčio liniją išryškėja, kad danga glaudžiai prigludusi prie pagrindo ir atkartoja jo mikroreljefą. Sąlyčio linijoje pastebėtos poros, kurių susidarymą lėmė purškimo lašelių neužpildyti substrato mikronelygumai.

Analizuojant 3.6–3.9 paveiksluose pateiktas mikrostruktūras iš visų tirtų dangų labiausiai išsiskyrė Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangos. Šių dangų struktūrose aptikta vertikalų įtrūkių. Šie defektai susidarė dėl vidinių liekamųjų įtempių, kurie dangose susiformavo dangos aušimo metu. Vidiniams įtrūkiams didelės įtakos turėjo ir cheminė purškiamosios medžiagos sudėtis. Šio tipo dangose buvo didžiausias chromo ir anglies kiekis, todėl tikėtinas kietų karbidų susidarymas ir mikroįtrūkių formavimasis. Analizuojant mikroįtrūkius pastebėta, kad jie tarpusavyje susijungia. Įtrūkių dydis dangose kinta nuo 2 μm iki 34 μm. Matuotų mikroįtrūkių vietos pavaizduotos 3.10 paveiksle, o gautų įtrūkių pasiskirstymas pavaizduotas 3.11 paveiksle. Analizuojant defektų atsiradimą dangų sluoksniuose pastebėta, jog įtrūkių pasiskirstymas labai netolygus. Daugiausia įtrūkių aptikta visuose dangos sluoksniuose užpurškiant dangas 380 A srove. Mažiausiai defektų aptikta dangose, užpurkštose naudojant 350 A sroves. Čia susiformavę įtrūkiai buvo mažiausi, o jų pasiskirstymas aptiktas tik viršutiniuose ir apatiniuose dangų sluoksniuose. Daugiausia apatiniuose dangų sluoksniuose aptikta įtrūkių, kai purškimui buvo naudota 320 A srovė. Toks mikroįtrūkių išsidėstymas suteikia vertingos informacijos apie dangos sluoksniuose esančius vidinius įtempius. Trūkiai parodo, kuriuose dangos sluoksniuose jie viršijo lamelių stiprumo ribą, dėl ko dangoje buvo sumažinti vidiniai įtempiai. Matyti, kad trūkiai ties lamelių ribomis užsidaro ir neplinta. Šiuo atveju trūkių vaidmuo dvilypis. Viena vertus, jie mažina vidinius dangos įtempius, kita vertus, jie skaldo dangą.

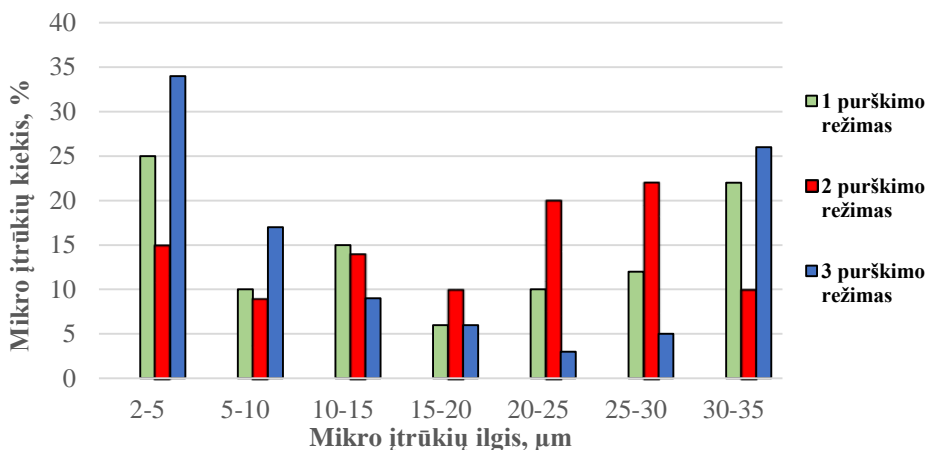
Taip pat šių mikroįtrūkių susiformavimą nulėmė grūdelių paviršiuje išsiskyrę chromo karbidai. $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ karbidai difundavo į grūdelių pakraščius. Čia susidariusios karbidų kolonijos, veikiamos didelių vidinių įtempių, suardė tarpatomicinius ryšius tarp grūdelių. Tokių karbidų formavimąsi grūdelių pakraščiuose nulėmė purškimo metu fakele naudojama aukšta lydymosi temperatūra ir staigus skysto metalo aušimas, dėl ko dangose ir pradėjo formotis mikroįtrūkiai.



3.10 pav. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangų mikrostruktūros su mikroįtrūkiais dangose:

a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.10. The microstructures of the Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) type of coatings with micro cracks: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

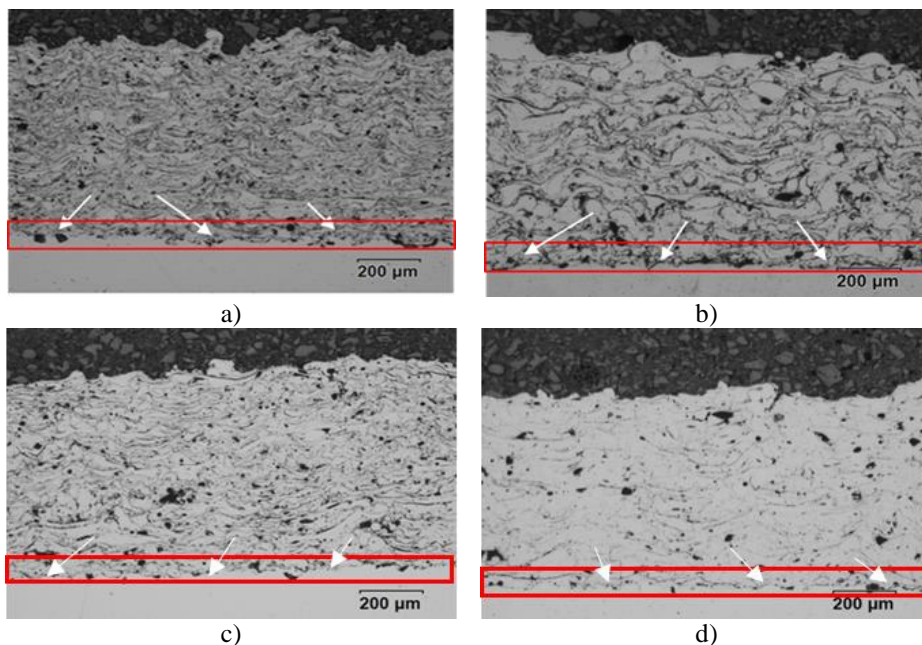


3.11 pav. Mikroįtrūkių pasiskirstymas Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose

Fig. 3.11. The micro crack distribution in the Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) type coatings

Analizuojant termiškai purkštų dangų mikrostruktūras vertikalčiai nuo substrato link dangos paviršiaus, nustatyta, jog dangų struktūrų susidarymas dažniausiai prasideda iš nesubliūškusių ir didesnio skersmens dalelių sluoksnio, kuris apytiksliai sudaro 5 procentus pirmojo dangos sluoksnio (3.12 pav.). Pirmasis suformuotos dangos sluoksnis apibrauktas raudona linija. Toks sluoksnio susidarymas ant substrato paviršiaus aiškinamas tuo, jog pradedant purkšti elektrolanki-

niu terminiu purškimu pirmieji išlydyti metalo lašeliai bloškiami ant šalto substrato. Kituose sluoksniuose išlydytos dalelės subliūkšta labiau, todėl sluoksniai tampa vientisesni ir tolygesni nei pirmasis.



3.12 pav. Nesubliūskusių, stambių lamelių išsidėstymas pirmame purškimo sluoksnyje:

- a) Fe-Mn-Cr-Mo danga; b) Fe-Mn-Cr-Mo-Ni danga; c) Fe-Mn-Cr danga;
d) Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) danga

Fig. 3.12. Not melted particles in the first spraying layer: a) Fe-Mn-Cr-Mo coating; b) Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coating; c) Fe-Mn-Cr coating; d) Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) coating

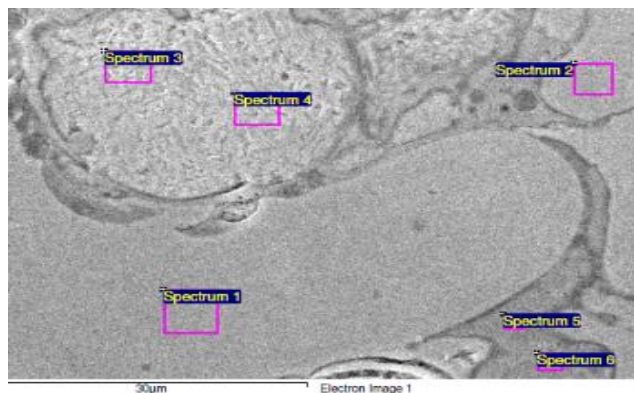
Elementinė atskirų fazių ir sričių sudėtis buvo nustatoma rentgeno mikroanalizės RMA metodu. Tiriant bandinius nustatyta, kad dangos yra heterogeninės sudėties. Tai yra dangos, suformuotos iš skirtingos cheminės sudėties dedamųjų dalių, pateikta 3.13–3.16 paveiksluose ir 3.2–3.5 lentelėse. Tai būdinga elektrolankiniu būdu purkštoms dangoms. Tiriant RMA metodu kai kuriose srityse nustatytas didelis anglies kiekis, tai galima paaiškinti tuo, jog tirtos sritys – tai susiformavę karbidiniai junginiai. Šio tyrimo metu nustatytas atominis cheminių elementų kiekis ne visuomet sutampa su vieloje esančių legiruojančiųjų elementų procentiniu kiekiu. 3.13 paveiksle ir 3.2 lentelėje pateikti duomenys rodo, jog cheminė lamelių sudėtis labai skirtinga.

Lyginant Fe-Mn-Cr-Mo dangos RMA 1–3, 5–6 ir 4 tirtas sritis, matyti, jog chromo kiekis jose skiriasi apie 1,7 karto. Taip yra todėl, kad, lydantis elektrolankinio purškimo vielai elektros lanke, išsilydę maži skysto metalo lašeliai legiruojasi nevienodai. Legiruojančių elementų procentinis kiekis sumažėja, kadangi dalis elementų elektrolankinio purškimo metu išdega. Aptiktas chromo kiekis lamelėse apytiksliai vienodas. Tai susidaręs Cr_7C_3 chromo karbidas, o aplink juos gausu oksidinių darinių. Geležies kiekis lamelėse apytiksliai vienodas.

3.2 lentelė. Nurodytų sričių cheminė sudėtis, nustatyta RMA EDS būdu, Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangose

Table 3.2. Chemical composition of denoted areas in Fe-Mn-Cr-Mo type coatings determined by X-ray microanalysis (EDS)

Analizuojama sritis	Cheminių elementų kiekis, atomų %					
	C	O	Si	Cr	Mn	Fe
1 sritis (Spectrum 1)	3,2	4,10	1,76	6,80	1,2	82,94
2 sritis (Spectrum 2)	2,7	3,17	1,62	5,70	1,37	85,44
3 sritis (Spectrum 3)	2,7	4,16	1,36	5,86	1,20	84,72
4 sritis (Spectrum 4)	3,4	3,29	0,80	3,72	0,76	88,03
5 sritis (Spectrum 5)	3,5	1,90	0,62	6,35	0,94	86,69
6 sritis (Spectrum 6)	2,8	1,77	1,02	6,23	1,27	86,91



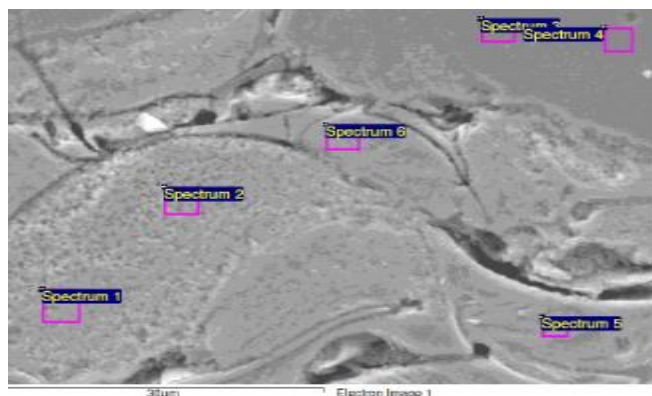
3.13 pav. Užpurkštos Fe-Mn-Cr-Mo dangos mikrostruktūra su nurodytomis RMA sritimis
Fig. 3.13. Microstructure of as-sprayed Fe-Mn-Cr-Mo type coating with denoted areas of X-ray microanalysis

Iš Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangos RMA analizės gautų rezultatų sudaryta 3.3 lentelė, kurioje matyti, jog šioje dangoje susiformavusi mikrostruktūra pasižymi labai panašia chromo, nikelio ir molibdeno sudėtimi, kaip ir nurodoma vielų cheminėje sudėtyje, kuri lygi Cr – 0,3 %, Ni – 1,5 % ir Mo – 4,8 %. Tačiau RMA analizės metu aptiktas gerokai padidėjęs anglies kiekis, susidaręs struktūrose.

3.3 lentelė. Nurodytų sričių cheminė sudėtis, nustatyta RMA EDS būdu, Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangoje

Table 3.3. Chemical composition of denoted areas in Fe-Mn-Cr-Mo-Ni type coatings determined by X-ray microanalysis (EDS)

Analizuojama sritis	Cheminių elementų kiekis, atomų %						
	C	O	Cr	Mn	Ni	Mo	Fe
1 sritis (Spectrum 1)	2,5	2,56	0,23	0,9	1,31	4,9	87,6
2 sritis (Spectrum 2)	2,9	2,07	0,24	0,95	1,41	4,2	88,23
3 sritis (Spectrum 3)	2,22	2,01	0,39	3,0	1,47	4,0	86,91
4 sritis (Spectrum 4)	3,2	0,99	0,45	1,0	1,61	4,5	88,25
5 sritis (Spectrum 5)	3,3	0,99	0,21	1,2	1,22	4,0	89,08
6 sritis (Spectrum 6)	3,0	2,22	0,27	0,91	1,56	4,8	87,24



3.14 pav. Užpurkštos Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangos mikrostruktūra su nurodytomis RMA sritimis

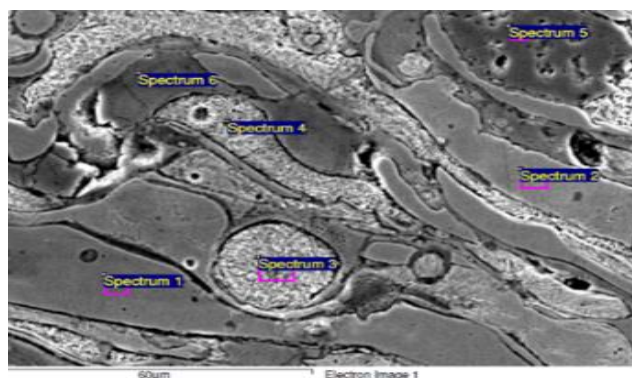
Fig. 3.14. Microstructure of as-sprayed Fe-Mn-Cr-Mo-Ni type coating with denoted areas of X – ray microanalysis

Fe-Mn-Cr dangų RMA analizė parodė (3.4 lentelė), jog trečioje tyrimų srityje nustatytas 0,3 % mangano ir beveik 3 kartus mažesnis chromo kiekis, o ketvirtoje tyrimų srityje du kartus mažesnis chromo kiekis. Galima teigti, jog šie išsilydę maži geležies lašeliai elektros lanke nebuvo gausiai legiruoti kaip kiti lašeliai. Kitų tirtų sričių (3.4 lentelė) RMA analizė sutampa su chemine vielų sudėtimi (2.1 lentelė).

3.4 lentelė. Nurodytų sričių cheminė sudėtis, nustatyta RMA EDS būdu, Fe-Mn-Cr tipo dangose

Table 3.4. Chemical composition of denoted areas in Fe-Mn-Cr type coatings determined by X-ray microanalysis (EDS)

Analizuojama sritis	Cheminių elementų kiekis, atomų %				
	C	O	Cr	Mn	Fe
1 sritis (Spectrum 1)	3,5	0,60	6,66	0,94	88,30
2 sritis (Spectrum 2)	3,2	0,37	6,24	0,99	89,38
3 sritis (Spectrum 3)	3,0	6,58	2,35	0,30	87,77
4 sritis (Spectrum 4)	1,0	8,13	3,09	0,82	86,96
5 sritis (Spectrum 5)	3,0	8,95	6,76	0,53	80,76
6 sritis (Spectrum 6)	3,2	9,08	5,19	0,6	81,93



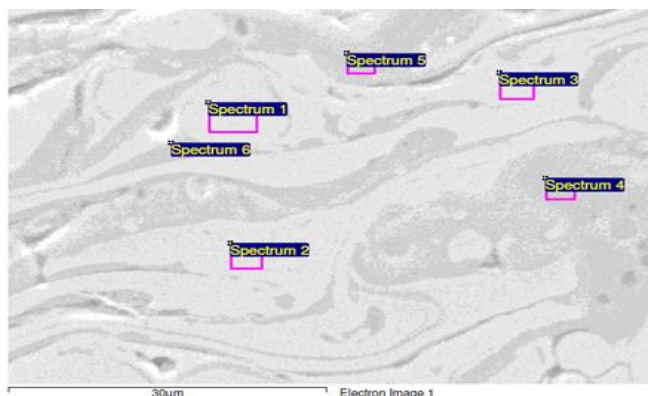
3.15 pav. Užpurkštos Fe-Mn-Cr dangos mikrostruktūra su nurodytomis RMA sritimis
Fig. 3.15. Microstructure of as-sprayed Fe-Mn-Cr type coating with denoted areas of X – ray microanalysis

Skirtinga cheminė lamelių sudėtis lemia formuojamos dangos heterogeniškumą. Ketvirtoje tyrimų srityje pateikta sudėtis, kurioje matyti didelis procentinis deguonies kiekis. Nuotraukoje matyti, jog tirtoje srityje susiformavęs oksidas. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangų analizė parodė, jog tirtoje 1 srityje susiformavusios lamelės cheminė sudėtis labai panaši (3.5 lentelė) į nurodytą cheminę vielos sudėtį (2.1 lentelė). 4–5–6 srityse nustatytas didelis O ir Cr kiekis. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangos cheminė sudėtis pateikta 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Nurodytų sričių cheminė sudėtis, nustatyta RMA EDS būdu, Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose

Table 3.5. Chemical composition of denoted areas in Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) type coatings determined by X – ray microanalysis (EDS)

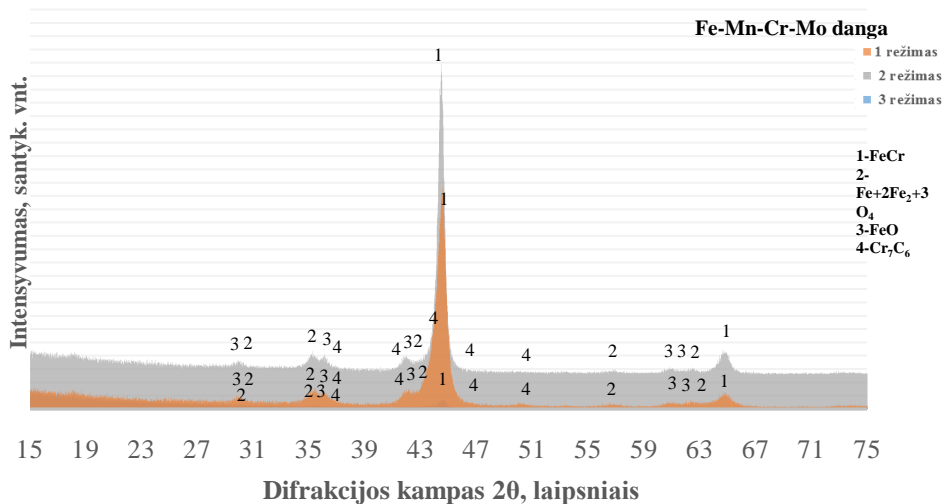
Analizuojama sritis	Cheminių elementų kiekis, atomų %			
	C	O	Cr	Fe
1 sritis (Spectrum 1)	5,2	0,83	25,14	68,83
2 sritis (Spectrum 2)	5,2	1,17	17,91	75,72
3 sritis (Spectrum 3)	5,0	2,99	14,86	77,15
4 sritis (Spectrum 4)	6,4	17,52	44,23	31,85
5 sritis (Spectrum 5)	4,8	0,82	22,56	71,82
6 sritis (Spectrum 6)	6,1	1,47	36,61	55,82



3.16 pav. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangos mikrostruktūra su nurodytomis RMA sritimis

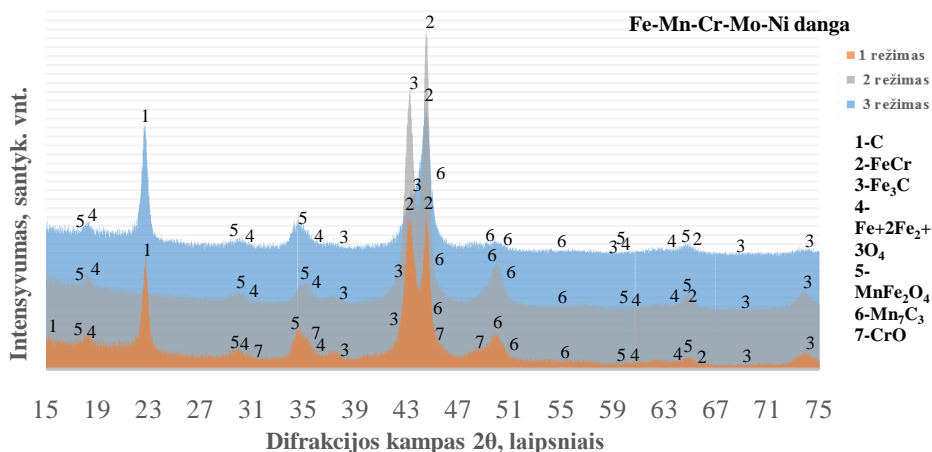
Fig. 3.16. Microstructure of as sprayed Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) type of coating with denoted areas of X-ray microanalysis

Siekiant išsiaiškinti, kokie junginiai susiformavo dangose, atlikta kokybės fazinė sudėties analizė (XRD). Šie tyrimai atlikti visoms keturioms dangoms su skirtingais purškimo parametrais. Terminio purškimo dangų difrakcinės kreivės pateiktos 3.17–3.20 paveiksluose. Kreivių pagrindą sudaro serijos didelių pikų, kuriuos galima priskirti prie keleto skirtingų junginių. Difraktogramų analizė parodė, jog skirtingose dangose gali būti susidarę MnFe_2O_4 , $\text{Fe}+2\text{Fe}_2+3\text{O}_4$ oksidai su kubine centruoto paviršiaus KCP kristaline gardele, FeO , CrO – oksidai; FeCr – kubinė centruoto tūrio KCI kristaline gardele; MnC_3 , Fe_3C – heksagone H kristaline gardele, bei $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$, Cr_7C_3 karbidai su kubine centruoto paviršiaus KCP kristaline gardele. Dangose su dideliu chromo kiekiu dominuoja junginiai su didesniu Cr ir mažesniu kitų elementų kiekiu (pvz., $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$, CrO). Dangose su didesniu mangano kiekiu dominuoja junginiai su Mn (pvz., MnFe_2O_4 , MnC_3). Dangose Fe-Mn-Cr-Mo nustatytas FeCr lydinys (3.17 pav.), sudarytas iš 50–70 % chromo. Šis junginys aptiktas visose trijose Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangose. FeCr junginys susiformuoja aukštoje temperatūroje – apie 2800 °C. Taip pat šiose dangose nustatyti FeO ir $\text{Fe}+2\text{Fe}_2+3\text{O}_4$ oksidai. Taip pat pavyko identifikuoti Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangose susidariusius $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ karbidus, Fe-Mn-Cr-Mo ir Fe-Mn-Cr tipo dangose Cr_7C_6 karbidus, o Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangose Mn_7C_3 karbidus. Danga Fe-Mn-Cr-Mo, užpurkšta trečiu režimu, išsiskiria tuo, jog joje nustatytas mažesnis fazių kiekis lyginant su kitais dviem režimais, nustatytos reikšmės mažos ir jų nustatyti nepavyko.



3.17 pav. Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangų difrakcinės kreivės
Fig. 3.17. XRD pattern of Fe – Mn – Cr – Mo type coatings

Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangų difrakcinės kreivės 3.18 paveiksle nustatyti $\text{Fe}+2\text{Fe}_2+3\text{O}_4$, MnFe_2O_4 ir CrO oksidai. Šio tipo dangos buvo legiruotos labai mažu chromo kiekiu (0,3 %), tad šiose dangose nesusidarė chromo karbidų, tačiau susidarė Mn_7C_3 karbidas, pasižymintis dideliu anglies kiekiu. Šis karbidas susidaro nuo 700 iki 1340 °C temperatūroje. Difrakcinės kreivės aptinkama daug smulkių pikų, kuriuos dešifruoti labai sunku, kadangi elektrolankinio purškimo dangose gali susidaryti daug skirtingų elementų junginių ar tų pačių cheminių elementų junginių, kurių pikai difraktogramose sutampa arba išsidėsto taip arti vienas kito, kad vienas kitą užstoja ir jų neįmanoma identifikuoti. Taip pat elektrolankinio purškimo dangos labai nevienalytės, analizavimo procedūrą apsunkina porėtumas.



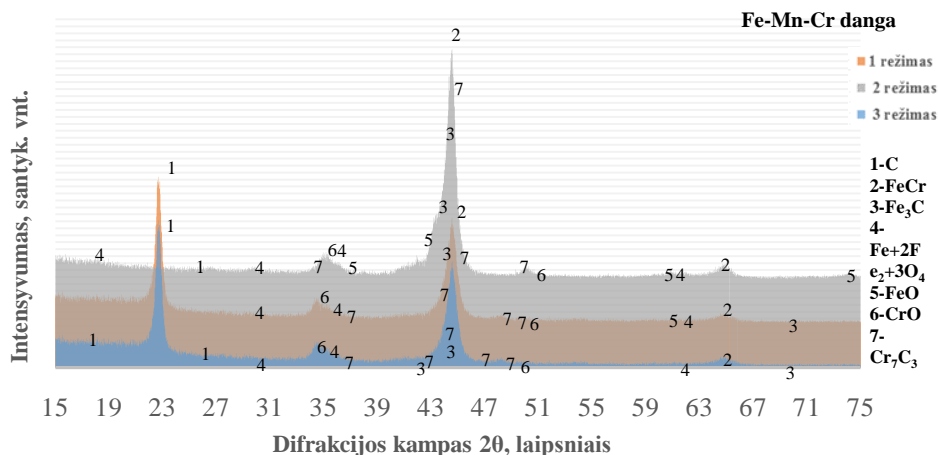
3.18 pav. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangų difrakcinės kreivės

Fig. 3.18. XRD pattern of Fe-Mn-Cr-Mo-Ni type coatings

Fe-Mn-Cr-Mo-Ni ir Fe-Mn-Cr tipo dangose nustatyti septyni junginiai. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr, Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangose taip pat identifikuota anglis. Analizuojant dangų difraktogramas aptikti labai panašūs pikai. Nustatyti skirtumai daugiausia susiję su pikų intensyvumu. Nedideli pikų intensyvumo pokyčiai nustatyti lyginant tų pačių dangų difraktogramas, gautas atliekant matavimus skirtingose dangų paviršiaus vietose.

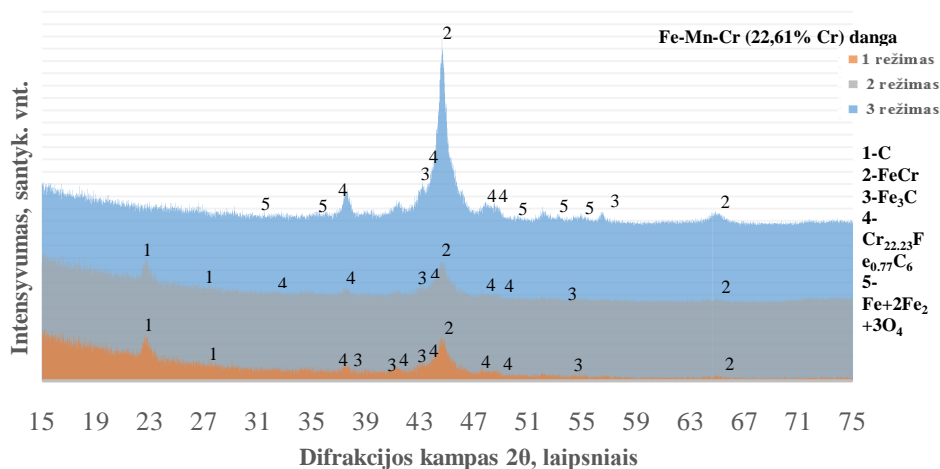
Pirmo ir antro purškimo režimais suformuotose dangose Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dėl labai smulkių pikų išsidėstymo nenustatyti $\text{Fe}+2\text{Fe}_2+3\text{O}_4$ oksidai, tačiau bendras visų trijų difraktogramų vaizdas vienodas, pikai beveik visose pozicijose sutampa, Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangų difrakcinės kreivės pateiktos 3.20 paveiksle. Gausiai chromu legiruotose Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose visais

trimis purškimo režimais identifikuotos susidariusios $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ bei Fe_3C karbidinės struktūros. Šių karbidų susidarymas dangose lemia itin geras tribologines dangų savybes.



3.19 pav. Fe-Mn-Cr tipo dangų difrakcinės kreivės

Fig. 3.19. XRD pattern of Fe-Mn-Cr type coatings



3.20 pav. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangų difrakcinės kreivės

Fig. 3.20. XRD pattern of Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) type coatings

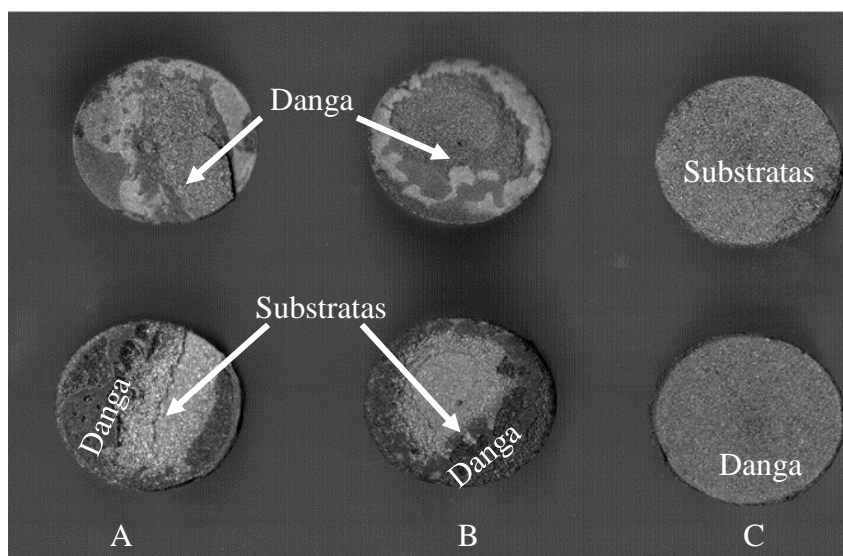
Visose tirtose dangose nustatyta, jog pikai išsidėstę beveik vienodai, o jų intensyvumo pokyčiai labai priklauso nuo dangų mikrostruktūros netolygumo ir

porų kiekio dangose, kurie ištirti ir nustatyti tiriant dangų mikrostruktūras. Analizė parodė, kad skirtingi purškimo režimai neturi įtakos fazinei dangų sudėčiai.

3.3. Dangų adhezijos tyrimai

Tempimo bandymai parodė, jog didžioji dalis bandinių (85 %) trūko per dangą, 15 % per klijus, kuriais buvo sujungtos bandymo tabletės su specialiais strypais. 3.21 paveiksle pateiktos Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangų nuotraukos po statinio tempimo bandymo. Nuotraukoje pateikti du tipiniai tempimo bandymo rezultatai. Pavaizduoti bandinių reversai ir aversai. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni bandinių (A ir B) trūkiai yra mišrūs. Dalis bandinio trūko per dangą, o kita dalis per sąlyčio liniją tarp dangos ir substrato. Šiuo atveju galima teigti, kad dangos adhezijos reikšmės yra artimos dangos kohezijos reikšmėms. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni bandinys (C) trūkęs tarp dangos ir substrato. Šiuo atveju išmatuotos dangos adhezijos reikšmės. Bandymų metu nė vienas bandinys netrūko per suklijuotus paviršius.

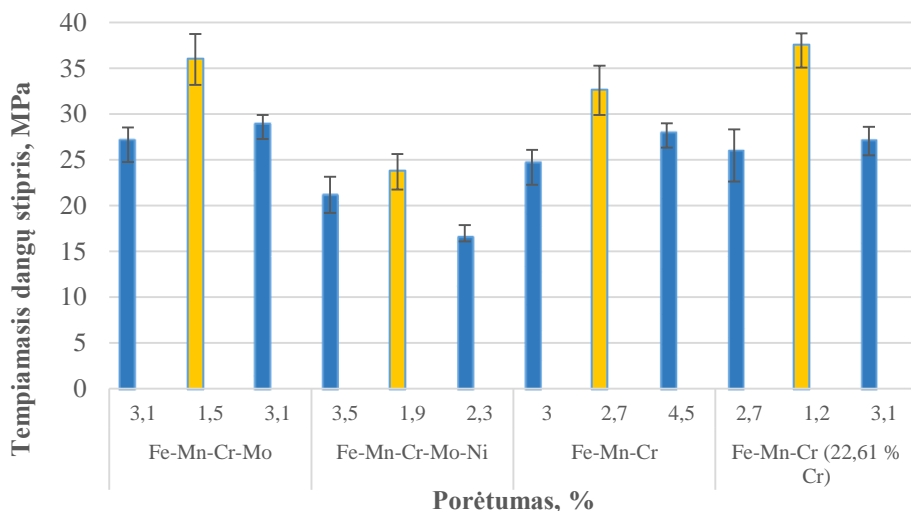
Matavimo rezultatai pateikti 3.22 paveiksle, o skaitinės reikšmės – A priede.



3.21 pav. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangų bandiniai po statinio tempimo bandymo
Fig. 3.21. The examples of Fe-Mn-Cr-Mo-Ni type coatings after the static tensile testing

Išanalizavus gautus duomenis paaiškėjo, jog poros mažina dangų adheziją. Fe-Mn-Cr-Mo tempiamojo dangų stiprio reikšmės purškiant (320 ir 380 A) srovėmis labai panašios 27,5 MPa, šių abiejų dangų porėtumas vienodas 3,1 %. Kur

kas didesnis dangų stipris išmatuotas antru purškimo režimu (350 A) užpurkštose dangose, jis siekė 35,9 MPa, kai dangų porėtumas 1,5 %. Mažiausios skaitinės reikšmės išmatuotos Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangose, adhezijos reikšmių vidurkis siekia 21,1 MPa purškiant 320 A srove, 23,8 MPa purškiant 350 A srove ir 16,6 MPa purškiant 380 A srove. Šios dangos pasižymėjo vidutiniu porų skaičiumi, purškiant visais režimais, lyginant su kitomis tirtomis dangomis. Fe-Mn-Cr dangose tempiamasis dangų stipris siekė 24,7 MPa purškiant dangas 320 A srove, 32,6 MPa purškiant 350 A srove ir 27,9 MPa purškiant 380 A srove. Šio tipo dangose nustatyti didžiausi porų kiekiai lyginant su kitomis dangomis, bet adhezijos ir kohezijos reikšmės nėra mažiausios, kadangi adhezija ir kohezija priklauso ir nuo cheminės dangos sudėties. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangų, užpurkštų pirmu ir trečiu režimais (320 ir 380 A), tempiamojo stiprio reikšmės siekė 26,5 MPa. Didžiausios skaitinės tempiamojo stiprio reikšmės (37,5 MPa) gautos purškiant 350 A srove, jos 1,4 karto didesnės nei pirmu ir trečiu purškimo režimais gautos reikšmės. Visose dangose, kuriose nustatytas dangų porėtumas 3,1 %, dangų adhezijos vidutinės reikšmės apytikslės ir siekia ≈ 28 MPa. 3.22 paveiksle pateiktos dangų tempiamojo stiprio priklausomybės skaitinės reikšmės nuo porų kiekio pasiskirstymo dangose. Adhezijos ir kohezijos rezultatai priklauso nuo atskirų lamelių išsidėstymo dangoje ir sukibimo su substratu. Tokie defektai, kaip tuštumos, poros, įtrūkiai ar oksidų samplaikos, blogina dangų adheziją, kadangi tarp lamelių neleidžia susidaryti stipriam metaliskajam ryšiui.



3.22 pav. Dangų tempiamojo adhezijos ir kohezijos stiprio priklausomybė nuo porėtumo
Fig. 3.22. The adhesion – cohesion strength dependence of the coating porosity

Nustatyta, kad skaitinės adhezijos reikšmės priklauso nuo tiriamų dangų storio (3.6 lentelė). Užpurkštų dangų storiai varijuoja nuo 890 iki 1050 μm . Matyti tendencija, kad tempiamasis stipris dangose mažėja, didėjant dangų storiui. Esant 890–900 μm dangų storiui, tempiamasis adhezijos ir kohezijos stipris siekia ≈ 32 –37 MPa ir sumažėja 17 %, dangų storiui didėjant iki 960–1050 μm .

3.6 lentelė. Dangų storio bei adhezijos ir kohezijos reikšmių priklausomybės

Table 3.6. Coating thickness and adhesion, cohesive values

Danga/purškimo režimas	Dangos storis, μm	Adhezija, MPa	Danga/purškimo režimas	Dangos storis, μm	Adhezija, MPa
Fe-Mn-Cr-Mo			Fe-Mn-Cr-Mo-Ni		
1 režimas	940	27,1	1 režimas	990	21,1
2 režimas	900	36,0	2 režimas	960	23,7
3 režimas	940	28,9	3 režimas	1050	16,6
Fe-Mn-Cr			Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr)		
1 režimas	990	24,7	1 režimas	940	26,0
2 režimas	900	32,5	2 režimas	890	37,5
3 režimas	940	27,9	3 režimas	940	27,1

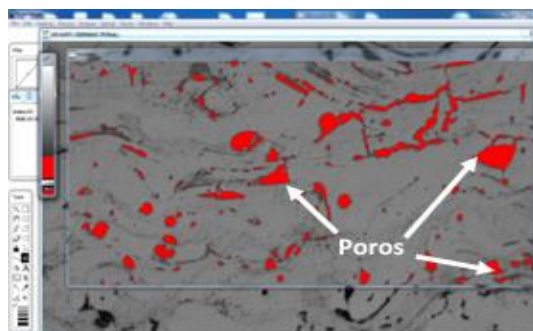
Geriausi dangų adhezijos rezultatai gauti naudojant 350 A sroves, kai dangoje suformuojamas mažas porėtumas. Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr ir Fe-Mn-Cr (22,61 %Cr) dangos užpurkštos antru režimu, kurių porėtumas siekia 1,5; 2,7; 1,2 %. Dangų adhezijos vidurkiai apytiksliai vienodi ir siekia 36,0; 32,6; 37,5 MPa. Apibendrinus galima teigti, jog dangų storis ir vidiniai dangų defektai tokie kaip poros turi įtakos dangų sukibimui tarp substrato ir dangos bei tarpusavio lamelių netvirtam sukibimui, taip pat mažina metališkojo ryšio stiprumą tarp užpurkštos medžiagos lamelių.

3.4. Dangų porėtumo ir oksidų procentinio kiekio nustatymas dangose

Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų porėtumas ir oksidų kiekis nustatytas analizuojant skaitmenines mikrošlifų nuotraukas su grafine programa „Scion Image®“. Pagrindinė šio tyrimo metodo esmė – porų ir oksidų ploto ir analizuojamo mikrošlifų ploto santykio nustatymas. „Scion Image®“ programa analizuoja

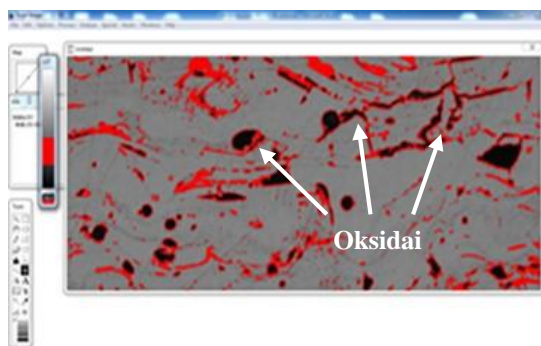
grafinį vaizdą ir apskaičiuoja atskirų grafinių objektų plotus. 3.23 paveiksle pavaizduotos raudonos spalvos zonos pilkame atspalvyje rodo tuštumas, kurias sudaro poros ir mikrošlifų darymo technologinio proceso metu išplėstos nesubliūskusios dalelės. 3.24 paveiksle raudona spalva aplink juodas dėmes pavaizduoti oksidai dangoje. Šviesiausia dalis – metalas. Kiekvienos bandymų serijos gauti rezultatai apdoroti „Microsoft Excel“ programiniu paketu.

Atlikti porų ir oksidų kiekio procentiniai skaičiavimai pateikti 3.6 lentelėje. Gautas struktūros sudedamųjų dalių procentinis pasiskirstymas leidžia spręsti apie technologinių parametrų įtaką dangų savybėms.



3.23 pav. Dangų porėtumo nustatymas „Scion Image®“ programa

Fig. 3.23. The porosity determination in the coatings using *Scion Image®* program



3.24 pav. Oksidų kiekio nustatymas dangose „Scion Image®“ programa

Fig. 3.24. The oxide inclusions determination in the coatings using *Scion Image®* program

Iš 3.7 lentelės duomenų matyti, jog mažiausias porų ir oksidų kiekis dangose nustatytas, taikant antrąjį purškimo režimą (350 A purškimo srovė). Esant šiems

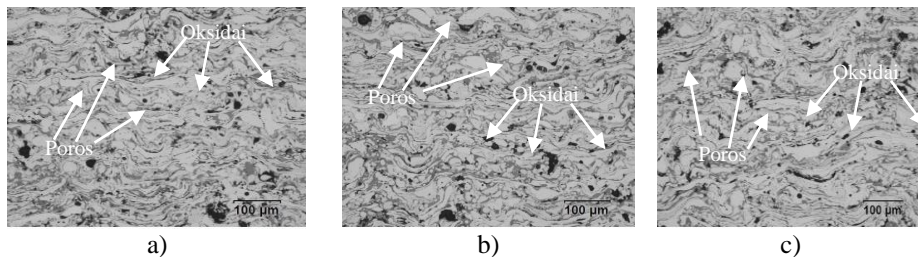
purškimo parametrų, gaunamas optimalus purškimo greitis su standartine purškimo tūta, kurio metu išlydyto metalo lašeliai dideliu greičiu bloškiami link substrato. Lyginant su kitais purškimo režimais (320 ir 380 A) lašeliai mažiau oksiduojasi fakele, o dangose formuojami lamelių sluoksniai tolygiai subliūkšta ir sudaro plonų sluoksnį, kuriame nesusiformuoja dideli porų tarpai. Naudojant mažesnes purškimo sroves (320 A) gaunamos dangos su didesniu porų ir oksidų kiekiu, lyginant su prieš tai buvusiu režimu. Granulometrijos tyrimai parodė (3.1 lentelė), kad, priklausomai nuo purškimo vielos, šiuo režimu purškiamos dalelės yra 30–70 % didesnio tūrio nei antro režimo dalelės, todėl nepakankamai įgreitinamos fakele ir keliauja link substrato ilgiau, daugiau laiko oksiduojasi purškimo aplinkoje, o dalis dalelių, patekusių ant substrato, negali subliūkšti dėl jas veikiančių paviršiaus įtempio jėgų ir oksidinės plėvelės. Naudojant 380 A sroves pernešami mažiausi lašeliai (3.1 lentelė), tačiau atlikti skaičiavimai parodė, jog purškiant šiuo režimu negaunamos mažiausios dangų porėtumo reikšmės (3.7 lentelė). Šį fenomeną galima paaiškinti nevienalyčiu porų ir oksidų formavimosi mechanizmu. Didelį jų kiekį nulėmė dėl didelės purškimo srovės (380 A) išaugęs šilumos kiekis fakele ir skystame lašelyje.

3.7 lentelė. Porų ir oksidų tarpų procentinis kiekis dangose

Table 3.7. The oxide and pore inclusions percent in the coatings

Danga	Purškimo srovė, A (-3 + 7A)	Įtampa, V (±1 V)	Porų kiekis, %	Oksidų kiekis, %
Fe-Mn-Cr-Mo				
1 režimas	320	31	3,1	15,2
2 režimas	350	34	1,5	7,9
3 režimas	380	32	3,1	11,9
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni				
1 režimas	320	31	3,5	10,9
2 režimas	350	36	1,9	5,6
3 režimas	380	38	2,3	7,0
Fe-Mn-Cr				
1 režimas	320	30	3,0	10,1
2 režimas	350	36	2,7	9,1
3 režimas	380	33	4,5	10,5
Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr)				
1 režimas	320	30	2,7	4,8
2 režimas	350	32	1,2	3,7
3 režimas	380	32	3,1	3,4

Dangų struktūros su porų ir oksidų tarpais pateiktos 3.25–3.28 paveiksluose. Iš nuotraukų galima matyti netolygų porų, oksidų ir dangos lamelių išsidėstymą, būdingą heterogeninei struktūrai.

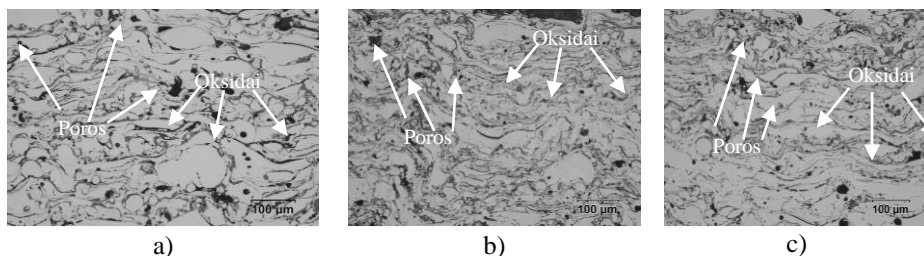


3.25 pav. Fe-Mn-Cr-Mo dangų struktūra su porų ir oksidų tarpais x 100:

a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.25. The inserts of the pore and oxide inclusions in coatings Fe-Mn-Cr-Mo:

a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

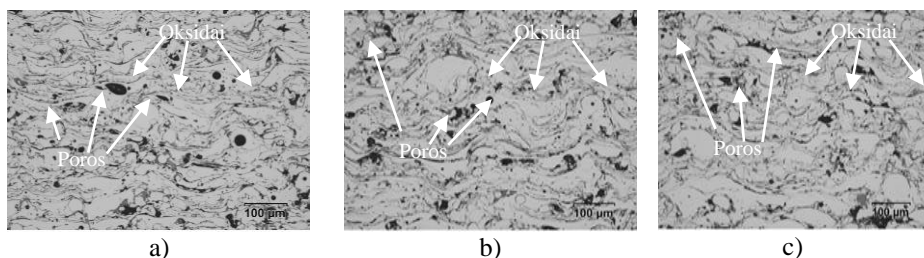


3.26 pav. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangų struktūra su porų ir oksidų tarpais x 100:

a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.26. The inserts of the pore and oxide inclusions in coatings Fe-Mn-Cr-Mo-Ni:

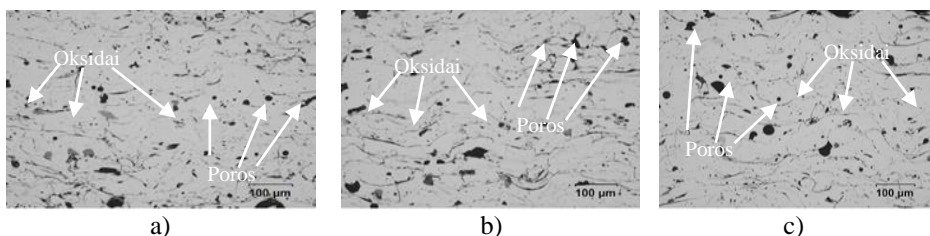
a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode



3.27 pav. Fe-Mn-Cr dangų struktūra su porų ir oksidų tarpais: a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.27. The inserts of the pore and oxide inclusions in coatings Fe-Mn-Cr:

a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode



3.28 pav Fe-Mn Cr (22,61 % Cr) dangų struktūra su porų ir oksidų tarpais:
a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.28. The inserts of the pore and oxide inclusions in coatings Fe-Mn Cr (22.61 % Cr): a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

Aukštesnės temperatūros sąlygomis lašeliai daugiau prisisotino deguonies ir azoto (pastarųjų tirpumas skystame lašelyje priklauso nuo cheminės lašelio sudėties), todėl kristalizacijos metu susiformavo didesnis porų kiekis. Dangos formavimosi metu, temperatūrai mažėjant ir lašeliui kristalizuojantis, ištirpusios dujos išsiskiria iš kristalinės gardelės dėl difuzijos ir, jei visiškai pašalinti dujoms iš dangos nėra galimybės, jos pasilieka dangoje sudarydamos smulkias sferines poras. Tokios mikroporos aptinkamos tiek dalelių pakraščiuose, tiek jų viduje.

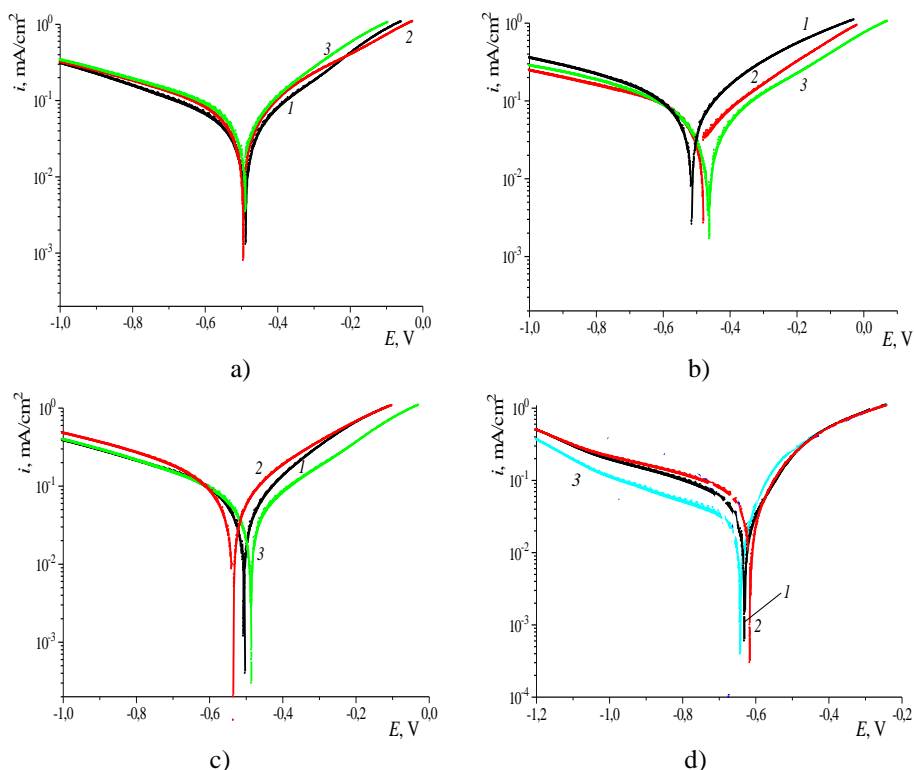
Oksidų formavimosi mechanizmas taip pat yra dvilypis. Iš vienos pusės, purškiamose dangose didesni lašeliai (320 A srovės) fakele turi mažesnę besioksiduojančio paviršiaus plotą, nei keletas mažesnių (350 ar 380 A) to paties tūrio lašelių. Iš kitos pusės, dangos oksidavimosi procesas vyksta ir lamelei subliūškus formuojamoje dangoje, kol jos neuždengia kitas atskriejęs lašelis. Purškimui naudojant mažesnius lašelius formuojamos tankesnės lamelės ir dangos paviršius perdengiamas greičiau. Šis dvilypis oksidų formavimosi mechanizmas parodė, kad purškimo metu tikslinga suformuoti optimalaus dydžio fakele lekiantį lašelį, kurio bendras oksidavimosi procesas (fakele ir subliūškus lamelei) būtų minimalus. Tokie rezultatai pasiekti naudojant 350 A sroves, o naudojant 320 A ir 380 A sroves didesnę oksidų kiekį nulėmė aprašyti oksidų formavimosi ypatumai.

3.5. Dangų korozinio atsparumo rezultatai

Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų termodinaminis polinkis elektrocheminei korozijai tirtas lyginant korozijos potencialus E_{kor} , gautus potenciodinaminės poliarizacijos matavimų metu. Siekiant nustatyti dangų struktūros ir cheminės sudėties įtaką antikorozinėms savybėms atlikti elektrocheminės korozijos bandymai. 3.29 paveiksle pateiktos potenciodinaminės poliarizacijos kreivės 3,4 % NaCl tirpale. Elektrocheminės korozijos rezultatai neparodė reikšmingos teigiamos chromo ir purškimo režimų įtakos korozijos srovės tankiui.

Dangose susiformavę chromo karbidai ir jų dariniai neigiamai veikia elektrocheminės korozijos rezultatus. Šie kietieji intarpai dangose traktuojami kaip defektai, kuriuose vyksta pasyvacijos sluoksnio pažeidimai anodiniame tirpale, kurie sukelia koroziją. Didžiausią įtaką elektrocheminei korozijai turėjo dangų struktūros heterogeniškumas, nulėmęs galvaninių porų susidarymą tarp dangos lamelių su skirtinga chemine sudėtimi.

Tyrimo metu nenustatyta, jog dangos, kurios pasižymėjo itin dideliu porėtumu ir oksidų intarpų kiekiu, turi mažesnę atsparumą korozijai.



3.29 pav. Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų potenciodinaminės poliarizacijos kreivės 3,4 % NaCl tirpale, 1 – 320 A; 2 – 350 A; 3 – 380 A: a) Fe-Mn-Cr-Mo dangos; b) Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangos; c) Fe-Mn-Cr dangos; d) Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangos

Fig. 3.29. Curves of thermal arc sprayed coatings potentiodynamic polarization in 3.4 % NaCl solution, 1 – 320 A; 2 – 350 A; 3 – 380 A: a) Fe-Mn-Cr-Mo coatings; b) Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coatings; c) Fe-Mn-Cr coatings; d) Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) coatings

Korozijos potencialai E_{kor} su srovėmis, kuriomis vyko bandymai, pateikti 3.8 lentelėje. Nagrinėjant kiekvieną dangą atskirai, matyti, kad Fe-Mn-Cr-Mo

dangų poliarizacijos kreivių pikai apytiksliai vienodi ($-0,4897/-0,4868$ V), didžiausią piko potencialą ($-0,4943$ V) pasiekia antruoju purškimo režimu. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangų, užpurkštų pirmu režimu (320 A), poliarizacijos kreivių pikai pasiekia ($-0,486$ V) potencialą. Šio tipo dangos, užpurkštos antru (350 A) ir trečiu (380 A) režimu, turi mažesnes ($-0,4781$ V ir $-0,4636$ V) potencialo reikšmes. Potencialų skirtumas tarp režimų taip pat minimalus.

3.8 lentelė. Dangų korozijos potencialai E_{kor} . NaCl terpėje

Table 3.8. Corrosion potentials E_{cor} . of thermal arc sprayed coatings in NaCl solution

Danga	Purškimo režimas	E_{kor} , V	I_{kor} , mA/cm ²
Fe-Mn-Cr-Mo	1 režimas	-0,4897	0,01513
	2 režimas	-0,4943	0,01717
	3 režimas	-0,4868	0,0276
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni	1 režimas	-0,486	0,02315
	2 režimas	-0,4781	0,03189
	3 režimas	-0,4636	0,01616
Fe-Mn-Cr	1 režimas	-0,5029	0,02318
	2 režimas	-0,536	0,02973
	3 režimas	-0,513	0,03485
Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr)	1 režimas	-0,6295	0,01743
	2 režimas	-0,6147	0,02346
	3 režimas	-0,6095	0,03558

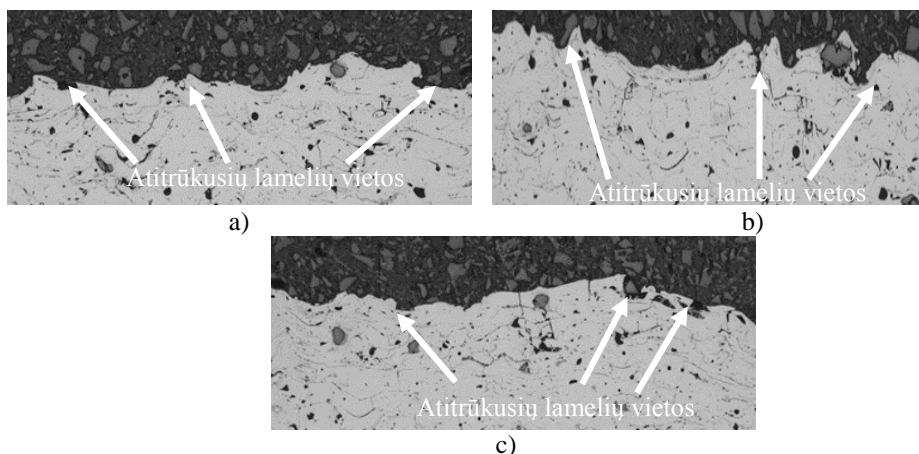
Fe-Mn-Cr dangų potencialų skirtumai tarp skirtingo purškimo režimų yra ryškiausi. Didžiausia potencialo reikšmė gauta purškiant antru režimu ($-0,536$ V), mažiausia reikšmė ($-0,5029$ V) gauta pirmu purškimo režimu. Tyrimo metu paaiškėjo, jog labiausiai neatsparios korozijai dangos, kurios pasižymėjo itin dideliu kietumu ir dideliu chromo kiekiu dangoje, nors dangos ir itin atsparios trinčiam. Didžiausi elektrocheminės korozijos potencialai gauti Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangose, kurie siekia ($-0,6295$ V (pirmas režimas)). Šios dangos labiausiai neatsparios korozijai. Pastebėta, jog dangose, kuriose susiformavo didesnis kietųjų in-tarpų $Cr_{22,23}Fe_{0,77}C_6$ kiekis, dangų atsparumas korozijai mažėja.

Visų dvylikos bandinių poliarizacinės kreivės turi vienodą formą. Tyrimų rezultatai rodo, kad purškimo režimai neturėjo reikšmingos įtakos korozinių procesų pobūdžiui. Tačiau pikų persislinkimas į didesnių potencialų sritį rodo didesnį konkretaus režimo dangos termodinaminį stabilumą 3,4 % NaCl terpėje.

3.6. Dangų šiuurkščio matavimai

Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų šiuurkštis tirtas skaitmeniniu profilometru „Hommelwerke LV-50 E“. Dangų paviršiaus šiuurkštis įvertintas paviršiaus šiuurkščio parametro R_a – vidutinio aritmetinio profilio nukrypimo (μm) matavimais. Atlikus matavimus pastebėta tendencija, jog vidutinis aritmetinis profilio nukrypimas mažėja dangose, kurios buvo dengiamos naudojant didelę purškimo srovę (380 A). Didinant purškimo srovę, formuojami smulkesni išlydyto metalo lašeliai, kurie užpurškiami didesniu greičiu ant substrato, nei naudojant mažesnes sroves. Didinant purškimo sroves, tuo pačiu metu didinamas ir elektrolankinės vielos tiekinimas, taip spartinamas procesas, kurio metu bloškiami išlydyto metalo lašeliai greičiau pasiekia substratą, subliūkšta, danga tampa glotnesnė.

Išmatuotos R_a reikšmės varijuoja nuo 21,19 μm iki 23,16 μm Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangose. Didžiausias (35,59 μm) dangų šiuurkštis išmatuotas Fe-Mn-Cr-Mo dangose, užpurkštose pirmu režimu. Tokį didelį paviršiaus šiuurkštį lėmė paviršiuje susidarę kietieji intarpai ir nesubliūškę išlydyto metalo lašeliai. Visose dangose pastebėta tendencija paviršiaus šiuurkščio priklausomybė nuo purškimo srovės, išskyrus Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangas, kurių paviršiuje nustatytas priešingas atvejis: didinant purškimo sroves vidutinis paviršiaus aritmetinis profilio nukrypimas didėja nuo 22,85 iki 29,35 μm . Siekiant paaiškinti šį fenomeną buvo papildomai atidžiai ištirtas dangų paviršius padarytuose mikrosliufuose. Pastebėta, kad dėl Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangoje esančių vertikalių įtrūkių paviršiuje aptiktos atitrūkusios pavienės lamelės, parodytos 3.30 paveiksle.



3.27 pav. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangoje atitrūkusių lamelių vietos:

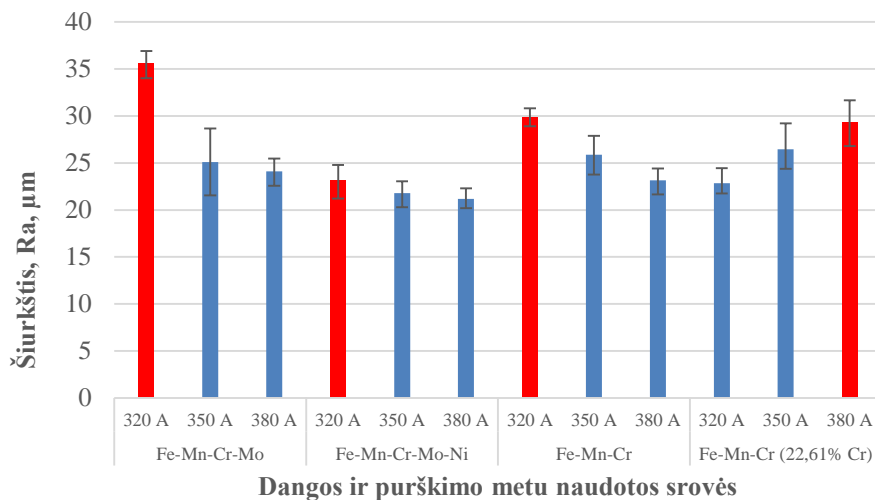
a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.27. The detached lamella space in Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr) coatings:

a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

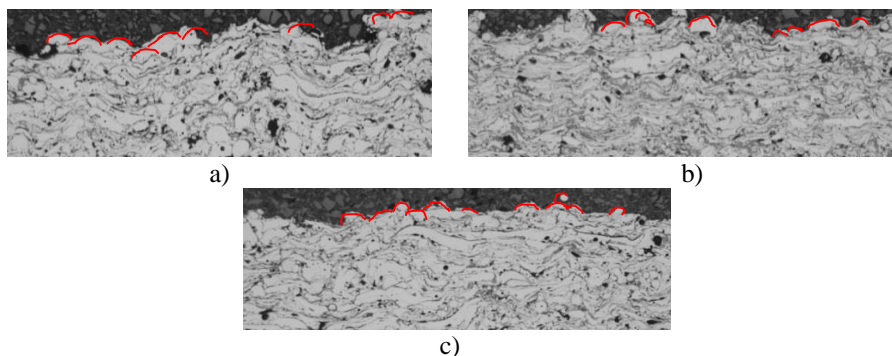
Duobučių atsiradimas lėmė didesnes Ra skaitines reikšmes, proporcingas vertikaliesiems trūkiams dangoje.

Dangų vidutinės šiurkštumo reikšmės pateiktos 3.31 paveiksle.



3.31 pav. Vidutinio aritmetinio profilio nukrypimo Ra (μm) pasiskirstymas dangoje
Fig. 3.31. The average values of roughness Ra of thermal arc spray coatings

Didžiausias duomenų išsibarstymas užfiksuotas Fe-Mn-Cr-Mo ir Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangoje. Tai nulėmė paviršiaus sluoksniuose nevysiškai išblūškusių dalelių samplaikos (3.32 ir 3.33 pav.).

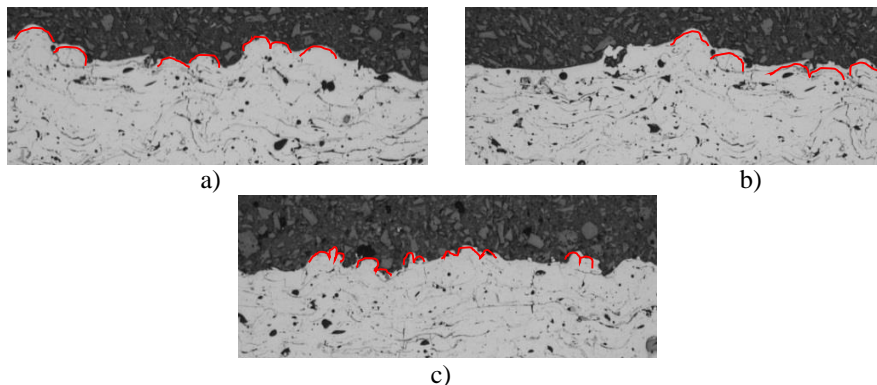


3.32 pav. Fe-Mn-Cr-Mo dangų paviršiuje nesubliūškusių dalelių samplaikos:

a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.32. Not shrunked particles of Fe-Mn-Cr-Mo coatings in the coatings surface:

a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode



3.33 pav. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangų paviršiuje nesubliūskusių dalelių samplaikos:

a) 1 purškimo režimas; b) 2 purškimo režimas; c) 3 purškimo režimas

Fig. 3.33. Not shrunked particles of Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings in the coatings surface: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

Iš paviršiaus šiurkštumo matavimų nustatyta, jog dangos priskiriamos 3–4 glotnumo klasei.

3.7. Dangų mikrokietumo ir tamprumo modulio nustatymas

Kietumas – tai medžiagos geba, veikiant išorinėms jėgoms, priešintis kito, už ją kietesnio, kūno įsmigimui, įspaudimui. Tamprumo modulis (Jungo modulis) – tai konstrukcinės medžiagos pastovioji, nusakanti medžiagos standumą ir parodanti jos gebą priešintis tampriajai deformacijai. Dėl formavimosi ypatumų ir lamelinės struktūros terminio purškimo metu gautos dangos pasižymi anizotropinėmis savybėmis, kurios priklauso nuo matavimų krypties. Dangas sudaro daugybė ištiskusių ir suketėjusių lašelių, suformavusių lamelinę dangos struktūrą, kurioje yra oksidų intarpų, porų, nesubliūskusių dalelių bei vertikalių plyšių, todėl dangos pasižymi savybių anizotropija. Akivaizdu, kad, priklausomai nuo indentoriaus orientacijos, skirsis ir matavimo rezultatai. Spaudžiant indentorių lygiagrečiai paviršiui (pirmoji orientacija), didelė tikimybė, kad įspaudui įtakos turės tarplamelinė zona, kurioje yra tuštumų ir oksidų sluoksnių, o matuojant antrąją orientacijos kryptimi reikia įvertinti vertikalius plyšius. Dėl dangos formavimosi ypatumų jos mechaninės savybės gali skirtis ir statmenai dangos paviršiui, einant nuo substrato

plokštumos link dangos paviršiaus. Įvertinus šiuos ypatumus, mikrokietumo matavimai atlikti visame skerspjūvio plotyje.

Nustatant porėtų dangų mikrokietumą, susidurta su struktūrinio nevienodumo problemomis. Matavimo apkrovos parinktos atsižvelgiant į sudedamąsias struktūros dalis. Parenkant pernelyg mažas reikšmes, gaunami rezultatai nekontingentiški ir su didelėmis paklaidomis. Naudojant dideles apkrovas, porėtų struktūrų išmatuoti negalima dėl struktūrinių dedamųjų netolygumo dangoje. Lamelės dažnai įlūžta ar sutrupa kietumo matavimo metu dėl veikiamo krūvio. Abiem atvejais matavimo metu gaunami tam tikri reikšmių išsibarstymai. Tyrimų metu mikrostruktūros tirtos mikro Vikerso metodu taikant 100 g ir 300 g apkrovas, matuojant vienos ar kelių lamelių kietumą. Gautos vidutinės skaitinės reikšmės pateiktos 3.9 lentelėje. Dangų mikrokietumo matavimai rodo, kad skirtingi rezultatai gaunami esant skirtingai medžiagų cheminei sudėčiai bei skirtingiems purškimo režimų parametrams, kurių metu suformuotos dangos skiriasi išsilydžiusių lamelių dydžiu bei oksidų ir porų tarpų kiekiu. Smulkesnės struktūros dangose gautos didesnės mikrokietumo reikšmės, o dangose su stambesnėmis lamelėmis mikrokietumo reikšmės mažesnės. Kietumo reikšmės dangose pasiskirsčiusios tolygiai, išskyrus tuos atvejus, kai matuojant kietumą indentorius įspaudžia po lamele esančias poras. Šiuo atveju gaunamas nekontingentiškas indentoriaus įspaudas, kuris nevertinamas.

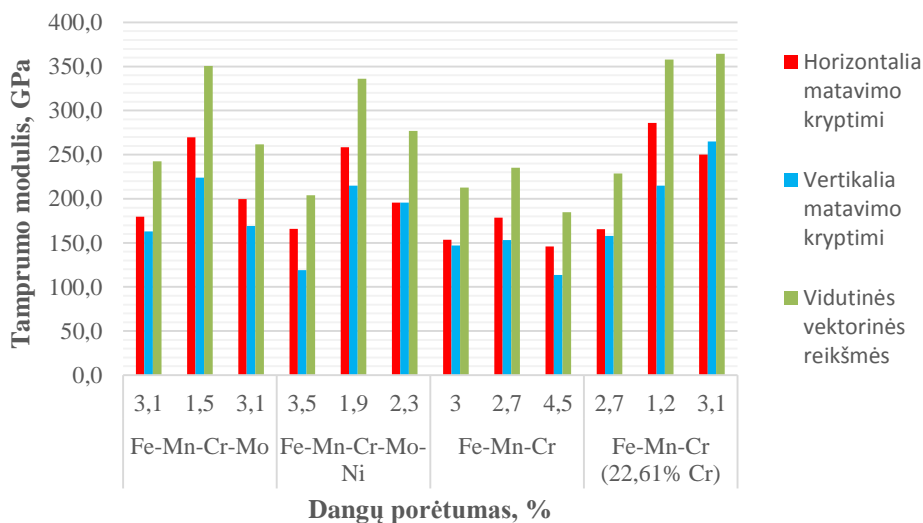
Mažiausias mikrokietumas nustatytas Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangose. Jis apytiksliai vienodas visiems purškimo režimams: naudojant 100 g apkrovą siekia nuo 581,5 HV iki 666,1 HV. Nedidelės kietumo skaitinės reikšmės nulėmė cheminę dangos sudėtį bei didelis porų ir oksidų kiekis. Naudojant 300 g apkrovą gautos 1,3 karto mažesnės reikšmės. Tokį skirtumą nulėmė tai, kad naudojant didesnes apkrovas yra matuojamas keleto lamelių mikrokietumas, taip pat išmatuojami porų ir oksidų tarpai, esantys tarp lamelių, dėl kurių dangos pasižymi anizotropinėmis savybėmis. Iš pateiktų duomenų matyti, jog visoms trimis Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangoms būdingas gana tolygus mikrokietumo pasiskirstymas. Gerokai didesnis mikrokietumas, beveik 2 kartus, nustatytas Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose lyginant su Fe-Mn-Cr dangomis. Šių dangų kietumas varijuoja nuo 1362 HV iki 1479 HV. Tai lėmė didelis chromo kiekis dangose, kuriose susiformavę $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ karbidai pasižymi dideliu kietumu. Literatūroje nurodoma, jog šių chromo karbidų kietumas gali būti: Cr_{23}C_6 976–1650 HV, Cr_7C_3 1336–2200 HV, Cr_2C_3 1350–2280 HV (Wank *et. al* 2006). Mikrokietumo rezultatai patvirtina, kad XRD analizės metu nustatyti $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ karbidai atitinka Cr_{23}C_6 , karbidų grupę.

3.9 lentelė. Dangų mikrokietumo matavimo rezultatai**Table 3.9.** Results of microhardness of sprayed coatings

Danga	Mikrokietumas HV 0,1	Mikrokietumas HV 0,3
Fe-Mn-Cr-Mo		
1 purškimo režimas	581,5	462,4
2 purškimo režimas	643,4	480,1
3 purškimo režimas	666,1	501,3
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni		
1 purškimo režimas	714,3	494,2
2 purškimo režimas	749,2	505,2
3 purškimo režimas	777,4	508,3
Fe-Mn-Cr		
1 purškimo režimas	724,4	556,2
2 purškimo režimas	805,6	604,4
3 purškimo režimas	835,9	591,7
Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr)		
1 purškimo režimas	1362,0	1184,1
2 purškimo režimas	1412,7	1192,4
3 purškimo režimas	1479,4	1234,2

Dangose tamprumo modulis nustatytas visame skerspjūvio plote dviem kryptimis – vertikalia ir horizontalia kryptimis substrato atžvilgiu. Matavimų reikšmės priklauso nuo matavimo krypties. Spaudžiant Knopo indentoriaus ilgąją įstrižainę lygiagrečiai substrato paviršiaus, matavimo rezultatams daugiau įtakos turi tarp-lamelinės zonos, kuriose yra oksidų bei porų. O spaudžiant ilgąją indentoriaus įstrižainę vertikaliai substrato atžvilgiu įvertinti dangoje esantys vertikalūs plyšiai. 3.34 paveiksle pateiktos tamprumo modulio reikšmės, matuotos horizontalia ir vertikalia kryptimi, bei šių matavimų vektorinė sudėtis, parodanti vidutinę dangos tamprumo modulio reikšmę. Matavimų rezultatai rodo, jog dangų tamprumo modulio reikšmės priklauso nuo purškimo metu dangose susiformavusių porų kiekio. Didesnės tamprumo modulio reikšmės gautos išmatavus paviršių Knopo indentoriumi horizontalia kryptimi nei vertikalia. Jos vidutiniškai visose dangose didesnės 1,2 karto. Matuojant vertikaliai, į matuojamąją zoną patenka daugiau

porų ir oksidų intarpų, kurie sumažina tamprumo modulio skaitines reikšmes. Pastebėta, jog didelis porų kiekis nustatant tamprumo modulio reikšmes turi įtakos tiek matuojant paviršių vertikaliai, tiek ir horizontaliai. Matavimo metu naudota 200 g apkrova, kadangi naudojant mažesnes apkrovas gauti nekorektiški įspaudai.



3.34 pav. Dangų tamprumo modulio nustatymas horizontalia matavimo kryptimi
Fig. 3.34. The modulus of elasticity in the coatings horizontal direction of measurement

Iš pateiktų grafikų matyti, jog maksimalios tamprumo modulio reikšmės Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr-Mo-Ni ir Fe-Mn-Cr tipo dangose yra esant mažiausiam porėtumui ir vidutiniam lamelių dydžiui. Ištyrus porėtumo pasiskirstymą dangų struktūroje, nustatyta, jog šio tipo dangose, didėjant porėtumui, dangų tamprumo modulis mažėja. Kitokio pobūdžio tendencija pastebėta Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose. Iš 3.30 paveikslo matyti, kad trečiuoju režimu užpurkšta danga, turinti 3,1 % porėtumą, pasižymi didžiausia tamprumo modulio reikšme (364,3 GPa). Antruoju režimu užpurkšta danga turi tik 1,2 % porų, o tamprumo modulio reikšmė skiriasi nedaug (357,8 GPa), pirmojo režimo danga su 2,7 % porėtumu turi tik 228,8 GPa tamprumo modulį. Iš šių rezultatų matyti, kad šio tipo dangų tamprumo moduliui lemiamą įtaką daro vertikalūs plyšiai, esantys tarp lamelių, kurie sumažina vidinius įtempius.

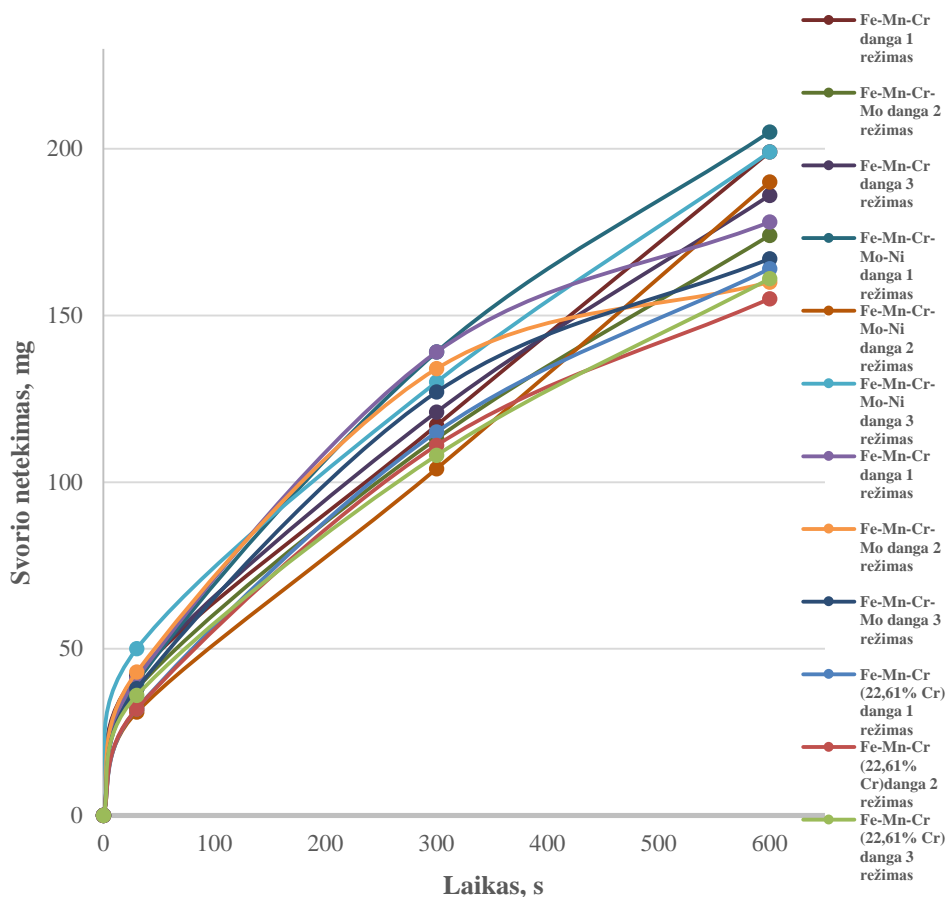
3.8. Dangų dilimo rezultatai

Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų atsparumas dilimui įvertintas sausosios, šlapiosios ir slydimo trinties bandymais, kurių metu buvo nustatomas bandomųjų dangų storio, svorio ir išdilimo pokytis.

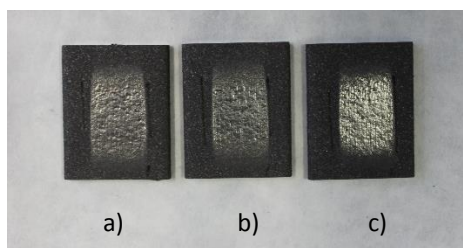
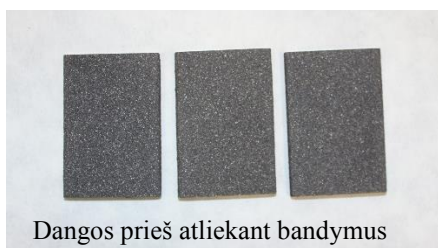
3.8.1. Sausosios trinties rezultatai

Sausosios trinties metu bandiniai trinami į besisukantį guminį diską su tiekiamu kvarciniu smėliu, taip imituojant realias darbinės sąlygas. Bandiniai su dangomis tirti keliais etapais. Gauti skirtingi rezultatai. Iš pateikto grafiko 3.35 paveiksle matyti, jog mažiausi išdilimo rezultatai gauti dangose naudojant antrąjį purškimo režimą, nors didžiausiu mikrokietumu pasižymi dangos, purkštos trečiuoju režimu. Akivaizdu, kad purškimui naudojamos elektros lanko srovės didinimas didina dangų mikrokietumą, tačiau jis neturi tokios didelės įtakos atsparumui sausajai trinčiai, kaip dangose esantis porėtumas. Mažiausias dangų porėtumas ir oksidų kiekis gautas esant antrajam režimui. Šie duomenys sutampa su sausosios trinties bandymų rezultatais. Galima daryti išvadą, kad trinties metu į dangoje esančias tuštumas (poras) įsiskverbia smėlio dalelės ir dangos ardymo procesas vyksta intensyviau. Pastebėta, kad didelis svorio netekimas nustatytas per pirmąsias 30 sekundžių. Tam turėjo įtakos paviršiaus mikronelygumai. Esant dideliame dangų paviršiaus šiurkštumui per pirmąsias bandymo 30 s kartu su smėliu pašalinami didesni dangos kiekiai, todėl svorio netekimo kreivės dalis – vertikali. Pašalinus dangos paviršiaus mikronelygumus dilimo procesas stabilizuojasi.

3.36 paveiksle pateikti bandiniai prieš ir po atliktų sausosios trinties bandymų. Eksperimentų metu nustatyta, jog atspariausios sausajai trinčiai yra Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) ir Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangos. Fe-Mn-Cr-Mo dangos eksperimento pradžioje praranda didžiausią svorį, lyginant su kitomis dangomis, vėliau šis svorio netekimas stabilizuojasi ir išlieka beveik toks pat iki bandymo pabaigos. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangų svorio netekimas užfiksuotas pats mažiausias. Šių dangų atsparumas sausajai trinčiai didžiausias. Per 600 s bandymų ciklą šios dangos bandiniai vidutiniškai neteko 1,3 % svorio. Lyginant su kitomis tirtomis dangomis tai labai atsparios dangos. Didžiausias svorio netekimas gautas Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangose, kai eksperimento metu užfiksuotas 199 mg svorio netekimas. Taip pat šio tipo dangoms nustatytos mažiausios adhezijos ir kohezijos reikšmės. Todėl sausosios trinties bandymo metu smėlio dalelėms lengviausia išplėsti dangos mikrodaleles ir dangos irimo procesas vyksta intensyviausiai.



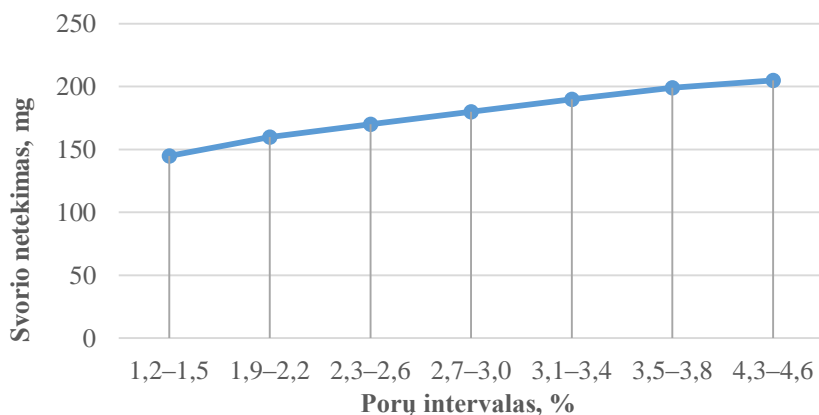
3.35 pav. Dangų svorio netekimas per 600 s laiko tarpą
Fig. 3.35. The weight loss in the coatings after 600 s



3.36 pav. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni dangų vaizdas prieš atliekant sausosios trinties bandymus ir po bandymų: a) po 30 s, b) po 300 s, c) po 600 s

Fig. 3.36. The view of the Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coatings before and after dry wear test:
a) after 30 s, b) after 300 s, c) after 600 s

3.37 paveiksle pateikta suminė tirtų dangų svorio netekimo priklausomybė nuo porų kiekio dangose. Grafikas išryškina tendenciją, kad didėjant porų kiekiui dangose auga svorio netekimas. Esant mažam porėtumui (1,2–1,5 %) vidutiniškai dangos praranda apie 146 mg svorio per 600 s ciklą, tai yra apie 1,3 karto mažiau nei dangos su 4,3–4,6 % porėtumu.



3.37 pav. Svorio netekimo priklausomybė nuo porų kiekio dangose
Fig. 3.37. The dependence weight loss on the pore volume in the coatings

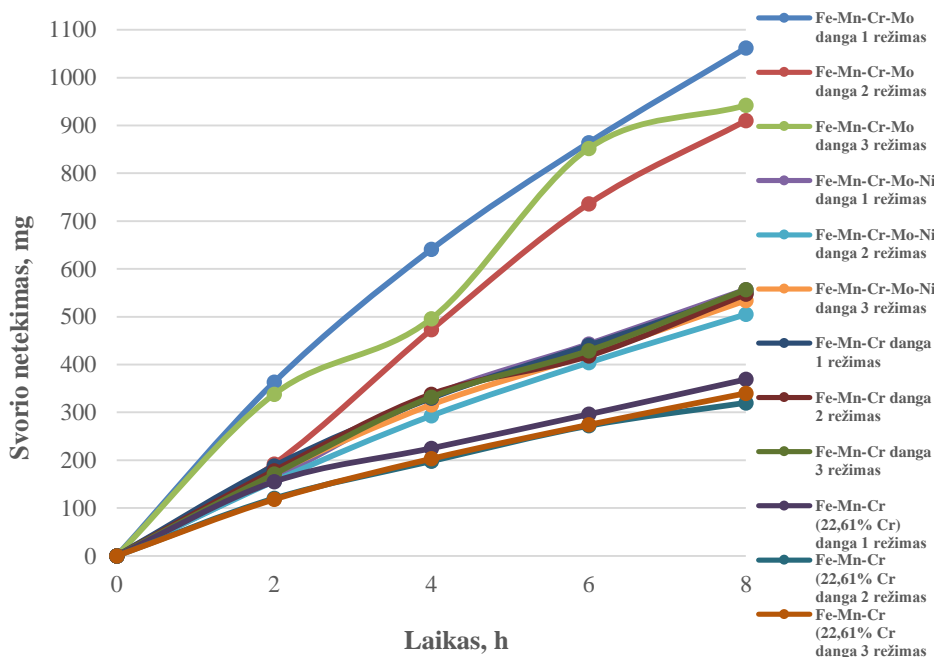
3.8.2. Šlapiosios trinties bandymų rezultatai

Dangų atsparumas dilimui vertintas atliekant šlapiosios trinties dilimo bandymus. Šių bandymų metu dangos testuotos 8 val. korundo ir vandens terpėje. Gauti skirtingi rezultatai. Jie pateikti 3.38 paveiksle, iš kurio matyti, kad per pirmąsias 2 bandymo valandas didžioji dalis dangų apytiksliai neteko nuo 120 iki 192 mg svorio. Tačiau Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangų 1 ir 3 režimais svorio netekimas buvo gerokai didesnis ir siekė nuo 338 iki 363 mg. Tolimesni bandymai parodė, jog per kitas valandas dangos svorį praranda tolygiai. Tačiau Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangų rezultatai parodė, jog ši danga šlapiosios trinties bandymams visiškai neatspari. Tyrimų metu dangos paviršius dilo itin greitai, o po 8 val. pirmu režimu užpurkštos Fe-Mn-Cr-Mo dangos ant substrato neliko. Tokį prastą šlapiosios trinties rezultatą lėmė mažiausias iš tirtų dangos kietumas (462 HV 0,3) ir porų (3,5 %) kiekis dangoje. 2 ir 3 režimu užpurkštos dangos taip pat prarado didelį svorį nuo 910 iki 942 mg. Fe-Mn-Cr-Mo dangos nepasižymi atsparumu šlapiajai trinčiai.

Fe-Mn-Cr-Mo-Ni ir Fe-Mn-Cr tipo dangų atsparumas šlapiajai trinčiai įvertintas vidutiniškai, gauti dangų trinties rezultatai labai panašūs. Po 8 val. bandymo

šios dangos prarado nuo 505 iki 615 mg svorio. Šių dangų svorio netekimas atvirkščiai proporcingas jų kietumui (494–604 HV 0,3). Porų kiekis (3,1–1,5 %) dangose neigiamai veikė šlapiosios trinties rezultatus.

Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangų šlapiosios trinties rezultatai geriausi. Svorio praradimas pats mažiausias (nuo 320 iki 369 mg). Taip pat šių dangų didžiausias kietumas (nuo 1184–1234 HV 0,3). Gerą atsparumą šlapiajai trinčiai nulėmė susiformavę $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ karbidai, kurie pasižymi dideliu kietumu.



3.38 pav. Elektrolankiniu būdu užpurkštų dangų atsparumas šlapiajai trinčiai

Fig. 3.38. The thermal arc sprayed coatings resistance to wet wear

Išanalizavus šlapiosios trinties bandymų rezultatus daroma išvada, kad dangų atsparumą šlapiajai trinčiai nulemia dangos kietumas. Poros neigiamai veikia bandymų rezultatus. Kitų dangų mechaninių ir morfologinių savybių sąsąjį su šlapiosios trinties rezultatais nenustatyta.

3.8.3. Slydimo trinties ir 3D profilometrijos rezultatai

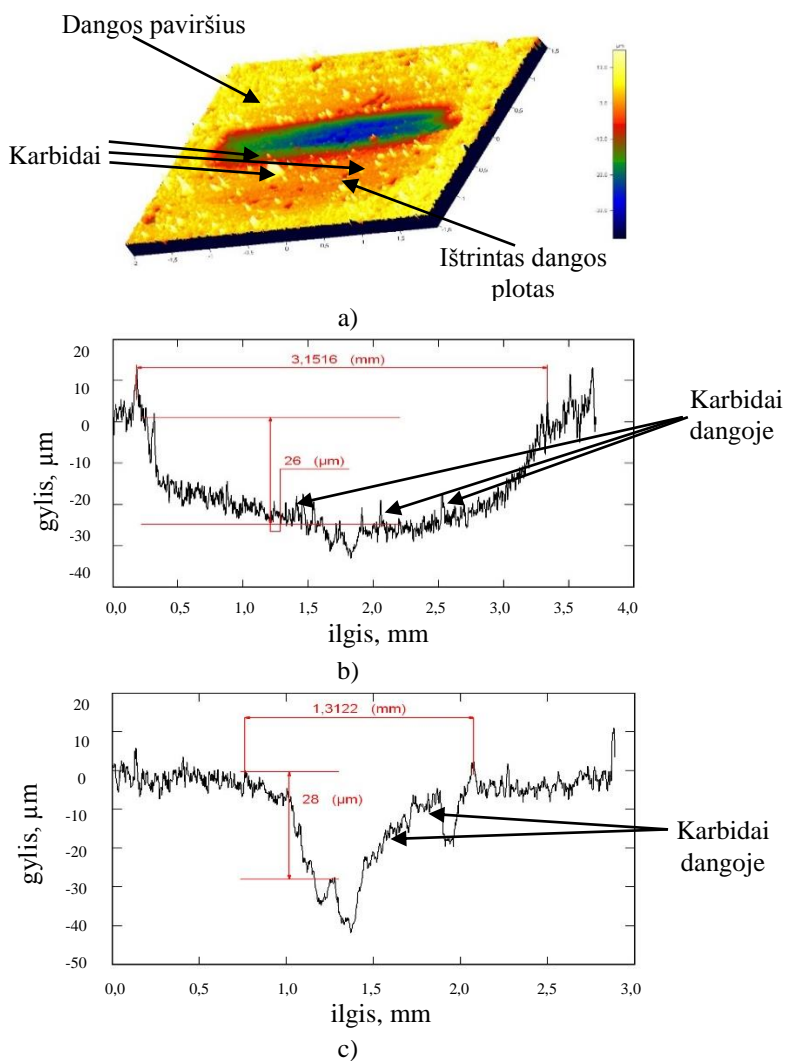
Apibūdinant dangų tribologines savybes tikslinga įvertinti dangų slydimo trintį. Tirtų dangų slydimo trinties rezultatai naudojant grūdintą indentorių pateikti 3.10 lentelėje.

3.10 lentelė. Dangų slydimo trinties rezultatai naudojant grūdintą indentorių**Table 3.10.** The results of sliding wear test using a hardened metal ball

Danga	Indento- riaus išdi- lęs plotas, μm ²	Dangų ištrintas tūris, mm ³	Matavimų kryptis			
			X ašimi		Y ašimi	
			Ilgis, μm	Gylis, μm	Ilgis, μm	Gylis, μm
Fe-Mn-Cr-Mo						
1 režimas	3643177,0	0,0521	3035,9	26,0	1560,9	26,7
2 režimas	4610989,1	0,0567	3064,9	20,7	1871,7	18,0
3 režimas	4899972,7	0,0525	3046,8	33,5	1092,7	20,0
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni						
1 režimas	4238639,9	0,0493	3043,4	25,0	1394,5	18,3
2 režimas	3962012,2	0,0386	3287,7	17,0	1131,4	18,0
3 režimas	3616893,6	0,0443	3246,7	20,7	1401,0	21,3
Fe-Mn-Cr						
1 režimas	4878678,0	0,0666	3162,9	30,7	1431,3	25,5
2 režimas	4969071,9	0,0611	2960,6	27,0	1763,1	19,7
3 režimas	4908868,5	0,0666	2878,4	41,0	1492,9	32,0
Fe-Mn-Cr (22,61% Cr)						
1 režimas	5322522,0	0,0325	2695,4	19,0	1443,6	18,3
2 režimas	5769972,7	0,0304	2573,8	17,0	1148,1	18,0
3 režimas	5800877,9	0,0359	2974,7	21,0	1310,0	21,3

Duomenys rodo, jog lemiamą įtaką gautos trinties reikšmėms daro dangų morfologija, o ne mechaninės savybės. Dangų kietumas neturi lemiamos įtakos šio tyrimo rezultatams. Šio eksperimento metu paaiškėjo, jog visos dangos, užpurkštos antruoju purškimo režimu, atspariausios slydimo trinčiams, naudojant grūdinto plieno indentorių, kurio kietumas 820 HV 0,3. Tirtų dangų Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr kietumas vidutiniškai buvo 1,5 karto mažesnis nei grūdinto indentoriaus, naudoto bandymo metu.

Atsparumą dilimui nulėmė dangų porėtumas ir chromo karbidinių darinių susidarymas. 3.39 paveiksle matyti, jog (Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr)) matuojant x ir y kryptimi ištrintose duobutėse ties viduriu aptiktas pikų padidėjimas – tai kieti dariniai dangoje (karbidai), neleidžiantys lengvai išdilti dangai.



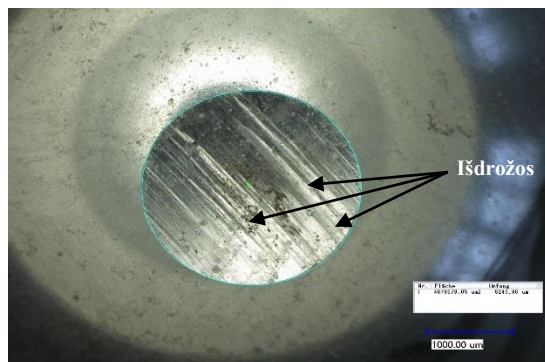
3.39 pav. 3D profilometru tirtos Fe-Mn-Cr dangos vaizdas po išdilio naudojant grūdinto plieno indentorių horizontalia ir vertikalia kryptimis: a) 3D profilometrijos vaizdas; b) matavimai x ašimi; c) matavimai y ašimi

Fig. 3.39. 3D profilometer view after sliding wear test using hardened metal ball in horizontal and vertical direction: a) 3D profilometer view; b) x-axis measurements; c) y-axis measurements

Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr ir Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangos legiruotos didesniais chromo kiekiais. Iš literatūros šaltinių žinoma, jog $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ ir

Cr_7C_3 karbidai pasižymi dideliu atsparumu trinčiai. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangos, legiruotos penkiakomponente legiravimo sistema, kurioje chromo kiekis neviršijo 0,3 %. Dėl didesnio Mn kiekio susidarė Mn_7C_3 karbidai. Šie karbidai nepasižymi dideliu atsparumu slidimo trinčiai, tad gauti rezultatai rodo, jog Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangos pačios neatspariausios šio tipo trinčiai, lyginant jas su likusiomis trimis dangomis. Rezultatai tarp skirtingo tipo dangų skiriasi 1,3–1,6 karto.

Išanalizavus 3D profilometrijos dangų atvaizdus ir grūdinto indentoriaus ištrintų paviršių padidintus vaizdus makroskopo (3.39 pav.) nustatyti sutapimai tarp ištrintos dangos duobučių ir grūdinto plieno indentoriuje aptiktų išdrožų (3.40 pav.). 3D profilometrijos pikai sutampa su indentoriaus išdrožomis. Vadinasi, dangoje yra kietesnės medžiagos už indentorių tarpai, kurie būdami dangoje sąveikauja su indentoriumi. Ištrintų duobučių forma vertikalia kryptimi neatsižvelgia.



3.40 pav. Grūdinto indentoriaus paviršius su išdrožomis po eksperimento

Fig. 3.40. The surface of hardened ball with mortises after the experiment

Slydimo trinties bandymai pakartotinai atlikti, naudojant keraminį indentorių, kurio kietumas 1310 HV 0,3. Toks indentorius parinktas neatsitiktinai, kadangi norėta išsiaiškinti dangų atsparumą trinčiai jas veikiant kietesniu ar bent jau panašaus kietumo kitu kūnu, kadangi Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangų kietumas apie 1200 HV 0,3. Po šio eksperimento paaiškėjo, jog atspariausios slydimo trinčiai, tiek naudojant grūdinto plieno, tiek keraminį indentorių, yra Fe-Mn-Cr ir Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangos. Naudojant Al_2O_3 indentorių Fe-Mn-Cr tipo dangose ištrintas dangos tūris buvo $0,0808 \text{ mm}^3$, o Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose tesiekė tik $0,0565 \text{ mm}^3$. Visais bandymo atvejais, išskyrus Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangas, mažiausias ištrintas tūris nustatytas dangose, kurios užpurkštos naudojant antrą purškimo režimą (350 A). Tirtų dangų slydimo trinties rezultatai naudojami keraminį indentorių pateikti 3.11 lentelėje.

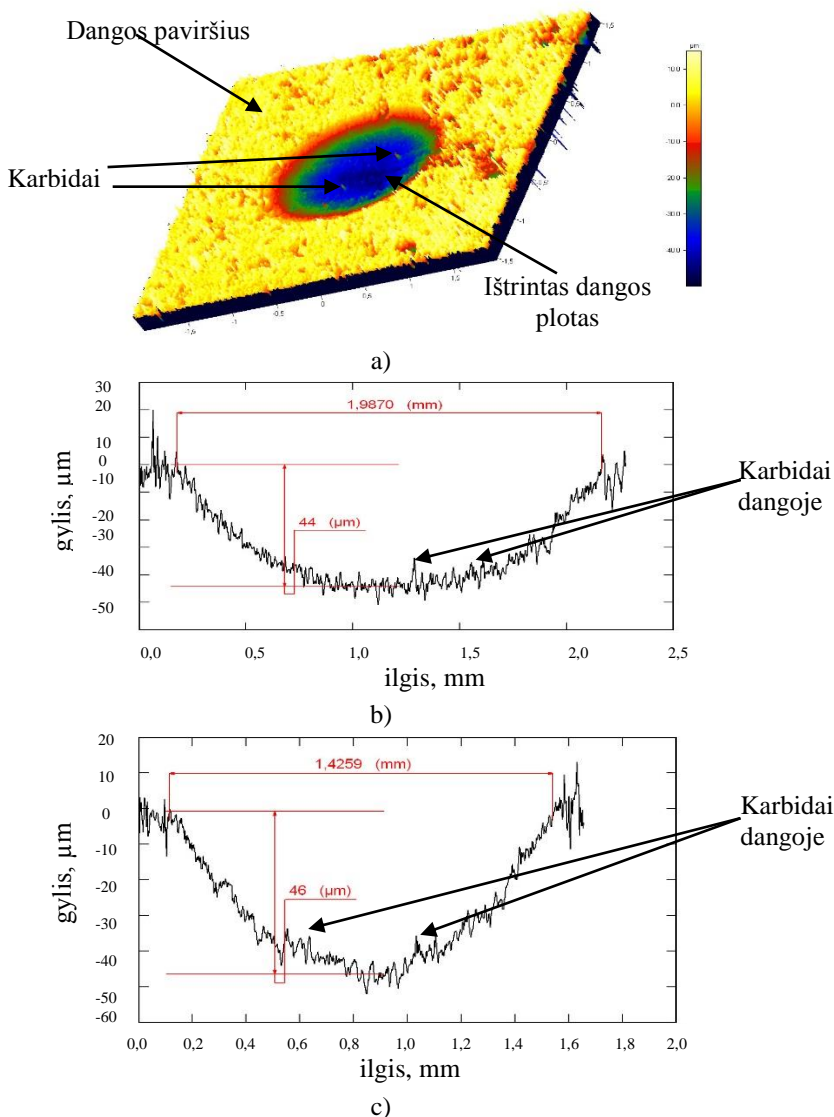
3.11 lentelė. Dangų slydimo trinties rezultatai naudojant Al_2O_3 indentorių

Table 3.11. The results of sliding wear test using Al_2O_3 ball

Danga	Indento- riaus išdi- lęs plotas μm ²	Dangų ištrintas tūris, mm ³	Matavimų kryptis			
			X ašimi		Y ašimi	
			Ilgis, μm	Gylis, μm	Ilgis, μm	Gylis, μm
Fe-Mn-Cr-Mo						
1 režimas	2122760,8	0,1282	2259,8	80,0	1776,7	80,0
2 režimas	2061092,3	0,1364	2259,1	83,5	1853,3	85,0
3 režimas	1964793,5	0,1408	2322,6	85,5	1866,1	86,5
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni						
1 režimas	2123086,3	0,1652	2400,3	95,0	1934,6	93,0
2 režimas	1577482,2	0,1400	2327,9	83,5	1810,1	85,5
3 režimas	2058132,4	0,1689	2422,6	94,5	1932,3	94,5
Fe-Mn-Cr						
1 režimas	2204038,3	0,1005	2194,7	75,5	1696,7	71,0
2 režimas	2754037,8	0,0808	2117,5	60,0	1537,8	59,5
3 režimas	2880112,6	0,0889	2118,6	60,2	1538,9	60,0
Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr)						
1 režimas	1535733,5	0,0703	2094,4	55,0	1483,1	57,0
2 režimas	1366474,4	0,0565	1968,6	45,5	1455,2	48,5
3 režimas	1434107,0	0,0714	2105,1	53,0	1481,0	55,5

3.41 paveiksle pateiktas 3D profilometru tirtos (Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr)) dangos vaizdas po išdilio naudojant Al_2O_3 . Sulyginus 3.39 ir 3.41 paveikslus matyti, kad dilimo pobūdis naudojant grūdinto plieno ir keraminį indentorius yra vienas.

Palyginus ištrinto tūrio reikšmes, pateiktas 3.9 ir 3.10 lentelėse, pastebėta, kad daugeliu atvejų naudodant keraminį indentorių ištrintas dangos tūris 2–3 kartus didesnis nei su grūdinto plieno indentoriumi. Slydimo trinties sąlygomis sparčiau dilo minkštesnis kūnas, todėl naudojant kietesnį indentorių dangos ištrinimo procesas vyksta sparčiau.

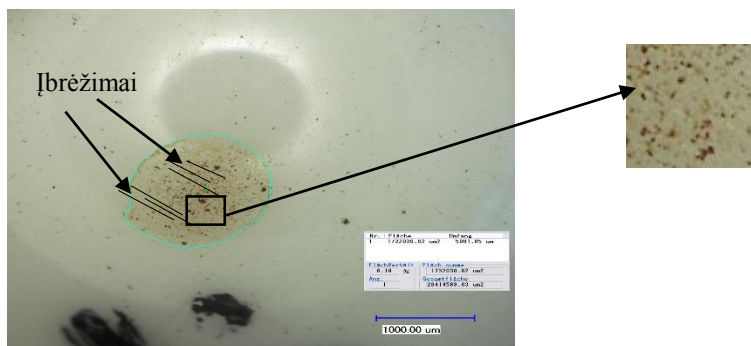


3.41 pav. 3D profilometru tirtos (Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr)) dangos vaizdas po išdilio naudojant Al_2O_3 indentorių horizontalia ir vertikalia kryptimis:

a) 3D profilometrijos vaizdas; b) matavimai x ašimi; c) matavimai y ašimi

Fig. 3.41. 3D profilometer view after sliding wear test using Al_2O_3 ball in horizontal and vertical direction in the Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coating: a) 3D profilometer view; b) x-axis measurements; c) y-axis measurements

Naudojant keraminį indentorių gaunama duobutė dangoje simetriška. 3D profilometrijos pikai neaptinkami. Keraminio indentoriaus paviršiuje aptinkami smulkūs įbrėžimai ir ištrupėjimai (3.42 pav.). Keramikoje ištrintas plotas 3–4 kartus mažesnis už grūdinto plieninio indentoriaus.



3.42 pav. Keraminio indentoriaus paviršius su išdrožomis ir ištrupėjimais po eksperimento

Fig. 3.42. The surface of ceramic ball with mortises and nicks after the experiment

Palyginus tirtų dangų difrakcinės fazinės analizės, mikroskopijos tyrimų ir slydimo trinties bandymų rezultatus, galima pastebėti, jog didžiausias atsparumas slydimo trinčiai gaunamas, kai karbidai dangose nėra dideli ir išsidėstę lamelėse tolygiai.

3.9. Trečio skyriaus išvados

1. Granulimetrinės analizės metu nustatyta, kad keičiant purškimo srovę galima keisti sferinių dalelių dydį. Didinant purškimo sroves nuo 320 A iki 380 A išlydytų metalo lašelių dydis vidutiniškai mažėja nuo 20,8 iki 9,2 μm .
2. Nustatyta, kad dangos lamelių dydis ir forma priklauso nuo purškimo parametrų kaitos. Srovėms didėjant (nuo 320 iki 380 A) formuojamos smulkesnės ir plonesnės lamelės. Sąlyčio linijoje aptiktų porų susidarymą lėmė purškimo lašelių neužpildyti substrato mikronelygumai. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose nustatyti vertikalūs įtrūkiai nuo 2 iki 34 μm , jų priežastis – vidiniai įtempiai dangoje.
3. Iš rentgeno mikroanalizės nustatyta, kad tirtos dangos yra heterogeninės sudėties, o dalis legiruojančiųjų elementų elektrolankinio purškimo metu

išdega, todėl atliekant RMA analizę nustatomų cheminių elementų procentinis kiekis skiriasi, lyginant su vielų chemine sudėtimi.

4. Kokybės fazinės analizės metu nustatyta, jog Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangose susiformavo FeCr lydiniai ir Cr₇C₆ karbidai, Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangose – Mn₇C₃ karbidai, Fe-Mn-Cr tipo dangose – Cr₇C₃ karbidai, o Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangose Cr_{22,23}Fe_{0,77}C₆ karbidai. Tyrimai parodė, jog visose tirtose dangose difrakcinių kreivių pikai panašios formos, jų intensyvumo pokyčiai labai priklauso nuo dangų mikrostruktūros netolygumo ir porų kiekio dangose. Skirtingi elektrolankinio purškimo režimai neturi įtakos fazinei dangų sudėčiai.
5. Nustatyta, kad dangų adhezijos ir kohezijos reikšmės priklauso nuo dangų storio ir morfologijos. Esant dideliame dangų porėtumui, adhezijos skaitinės reikšmės mažėja, nes mažėja metališkas ryšys tarp dangos lamelių. Didžiausios adhezijos reikšmės (37,5 GPa) gautos esant mažiausiam dangų porėtumui (1,2 %), naudojant 350 A purškimo srovę. Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr ir Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangos užpurkštos 2 režimu, kurių porėtumas siekia 1,5; 2,7; 1,2 %. Dangų adhezijos vidurkiai apytiksliai vienodi ir siekia 36,0; 32,6; 37,5 MPa. Mažiausios skaitinės adhezijos reikšmės gautos Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangose, 16,6 MPa.
6. Porų formavimąsi dangose nulėmė purškimo parametrai. Aukštesnės temperatūros sąlygomis lašeliai daugiau prisisotina deguonies ir azoto, todėl kristalizacijos metu sudaromos palankesnės sąlygos susiformuoti didesniai porų kiekiui. Nustatyta, kad oksidai dangose formuojami dviem etapais: oksiduojantis lekiu dalelėms fazele ir subliūškus ant paviršiaus. Optimalus purškimo parametrų parinkimas (350 A) leido sukurti dangas, pasižyminčias mažiausiu oksidų kiekiu Fe-Mn-Cr-Mo 7,9 %; Fe-Mn-Cr-Mo-Ni 5,6 %; Fe-Mn-Cr 9,1 %; Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) 3,7 %.
7. Atlikus šiurkščio tyrimus nustatyta, kad vidutinio aritmetinio profilio nukrypimo reikšmės (Ra) didinant purškimo srovę dangose mažėja: Fe-Mn-Cr-Mo nuo 35,59 iki 24,10 μm, Fe-Mn-Cr-Mo-Ni nuo 23,15 iki 21,19 μm, Fe-Mn-Cr nuo 29,87 iki 23,15 μm. Atvirkštinis procesas nustatytas Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangose, kai šiurkščio (Ra) reikšmės didėja nuo 22,85 iki 29,35 μm dėl vertikalų trūkių. Dangos priskiriamos 3–4 glotnumo klasei.
8. Atlikus potenciodinaminės poliarizacijos tyrimus nustatyta, kad korozijai neatspariausios $E_{kor} = -0,6295$ V, Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) dangos, kurios pasižymėjo didžiausiu kietumu ir chromo kiekiu. Kietieji intarpai

$\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ ir dangų heterogeniškumas mažina dangų atsparumą korozijai. Purškimo režimai neturi tiesioginio poveikio dangų antikorozinėms savybėms.

9. Nustatyta, kad dangų mikrokietumas priklauso nuo morfologijos ir medžiagos cheminės sudėties. Atliekant įspaudus su 100 g apkrova išmatuoti pavienių lamelių mikrokietumai, kurie yra didesni už keleto lamelių taikant 300 g apkrovą, nes tarpai, esantys tarp lamelių, mažina mikrokietumą. Didžiausią mikrokietumą (1479,4 HV 0,1 ir 1234,2 HV 0,3) turi Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) danga, užpurkšta tečiuoju režimu.
10. Ištirta, kad dangų tamprumo modulio reikšmės priklauso nuo matavimų krypties ir porų kiekio. Matuojant horizontaliai substratui gautos 1,2 karto didesnės reikšmės, nei vertikalčiai. Nustatyta, kad poros mažina tamprumo modulį Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr-Mo-Ni ir Fe-Mn-Cr tipo dangose. Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose tamprumo modulis priklauso nuo vertikalčių trūkių ilgio. Jiems mažėjant vidutinės reikšmės didėja nuo 228,8 iki 364,3 GPa.
11. Nustatyta, kad atspariausios sausajai trinčiai yra Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) (svorio netekimas nuo 161 iki 164 mg) ir Fe-Mn-Cr-Mo (svorio netekimas nuo 160 iki 178 mg) tipo dangos, pasižyminčios didžiausiomis adhezijos ir kohezijos reikšmėmis. Ištirta, kad esant 1,2–1,5 % porėtumui dangos praranda 1,3 karto mažiau svorio per 600 s ciklą, nei 4,3–4,6 % porėtumo dangos.
12. Ištirta, kad dangų atsparumą šlapiajai trinčiai nulemia dangos kietumas. Fe-Mn-Cr-Mo dangų svorio netekimas nuo 942 iki 1062 mg, o kiečiausios Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) nuo 320 iki 369 mg. Poros neigiamai veikia bandymų rezultatus. Kitų ryškių dangų mechaninių ir morfologinių savybių sąsąjų su šlapiosios trinties rezultatais nenustatyta.
13. Nustatyta, kad slydimo trinties rezultatai priklauso nuo indentoriaus tipo. Trinant grūdinto plieno indentoriumi ištrintų dangų tūris 2–3 kartus mažesnis nei keraminiu. Atspariausios slydimo trinčiai, naudojant keraminius indentorius, yra Fe-Mn-Cr ($0,0808 \text{ mm}^3$) ir Fe-Mn-Cr (22,61% Cr) ($0,0565 \text{ mm}^3$) tipo dangos. Visais bandymo atvejais, išskyrus Fe-Mn-Cr-Mo tipo dangas, mažiausias ištrintas tūris nustatytas dangose, kurios užpurkštos naudojant antrą purškimo režimą (350 A).

Bendrosios išvados

1. Bendradarbiaujant su vielų gamintoju, sukurtos ir ištirtos keturios naujos cheminės sudėties miltelinės vielos, pasižyminčios tinkamumu purškimo procesui ir skirtos plienų paviršiams stiprinti ar restauruoti.
2. Purškimo fakele skriejančių dalelių dydis priklauso nuo purškimo srovės. Naudojant mažas purškimo sroves (320 A) formuojami stambūs lašeliai, o didinant sroves jie smulkėja. Smulkiausi išlydyti lašeliai gaunami, kai naudojama 380 A srovė. Išlydytų dalelių skersmuo sumažėja vidutiniškai 56 %.
3. Purškiamų dalelių dydis nulemia dangos morfologiją. Varijuojant purškiamų dalelių dydžiu galima gauti dangas, geriausiai atitinkančias eksploatacines sąlygas. Esant 20,8 μm vidutiniam dalelių dydžiui lamelės storis 5 μm , o skersmuo 200 μm . Purškiamų dalelių dydžiui sumažėjus iki 9,2 μm , lamelės storis 2 μm , o skersmuo 180 μm .
4. Chromo ir anglies kiekis dangose lemia jų atsparumą trinčiai. Atspariausios sausajai, šlapiajai ir slydimo trinčiai yra Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) ir Fe-Mn-Cr tipo dangos, kuriose susiformavo chromo karbidai. Sausosios trinties sąlygomis mažiausiai išdyla Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) (155 mg) ir Fe-Mn-Cr (171 mg) tipo dangos. Šlapiosios trinties sąlygomis Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo danga netenka 320 mg,

o Fe-Mn-Cr tipo danga netenka 1,6 karto, (505 mg) daugiau svorio. Slydimo trinties sąlygomis Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangos praranda 1,4 karto mažiau dangos tūrio nei Fe-Mn-Cr tipo danga. Dangų tolygų kietumą ir atsparumą šlapiajai, sausajai ir slydimo trinčiai lemia $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$, Cr_7C_3 karbidai, susiformavę dangose purškimo metu. Mn_7C_3 karbidai, susiformavę Fe-Mn-Cr-Mo-Ni tipo dangose, pasižymi geresnėmis tribologinėmis savybėmis esant sausajai trinčiai nei šlapiajai.

5. Dangų heterogeniškumas ir susiformavę $\text{Cr}_{22,23}\text{Fe}_{0,77}\text{C}_6$ karbidai blo-gina atsparumą korozijai. Mažiausios elektrocheminės korozijos po-tencialai gauti Fe-Mn-Cr (22,61 % Cr) tipo dangose $E_{kor} = (-0,6295 \text{ V})$. Atspariausios korozijai Fe-Mn-Cr-Mo-Ni $E_{kor} = (-0,4636 \text{ V})$, kuriose susiformavo Mn_7C_3 .

Literatūra ir šaltiniai

- Ajdelsztaj, L.; Zuniga, A.; Jodoin, B.; Lavernia, E. J. 2006. Cold – spray processing of a nano crystalline Al-Cu-Mg-Fe-Ni alloy with Sc., *Thermal spray Technology* 15: 184–190.
- Aliofkhazraei, M. 2014. *Thermal spray nanostructured ceramic and metal – matrix composite coatings. Anti – abrasive Nanocoatings. Current and future applications*. Elsevier Science & Technology: 481–511.
- Astakhov, A. 2008. Controlling the properties of detonation-spray coatings: major aspects, *Powder Metall. Met. Ceram.* 47(1–2): 70–79.
- ASTM G65-04. 2010. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*.
- ASTM G75-07. 2013. *Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)*.
- Bach, F. W.; Laarmann, A.; Wenz, T. 2006. *Modern surface technology*. Wiley-VCH Weinheim, Germany: 122–123.
- Baltušnikas, A.; Levinskas, R.; Lukošiučė I.; Grybėnas, A.; Kriūkienė, R. 2009. Karštyje stiprių plienų degradavimo įvertinimas metalų struktūros tyrimo metodais, *Energetika* 55(1): 47–52.
- Beauvais, S.; Guipont, V.; Jeandin, M.; Jeulin, D.; Robisson, A.; Seanger, R. 2008. Study of the porosity in plasma-sprayed alumina through an innovative three-dimensional simulation of the coating buildup, *Metallurgical and Materials Transactions A* 39(11): 2711–2724.
- Bodzin, K.; Schläfer, T.; Richard, K.; Warda, T. 2009. High performance – Low costs: Iron Based Coatings with Improved Microstructures for Wear and corrosion Applications, *Expanding thermal Spray Performance to New Markets and Applications (ASM International)*: 1178–1182.

- Bolot, R.; Planche, M.-P.; Liao, H.; Coddet, C. 2008. A three-dimensional model of the wire-arc spray process and its experimental validation, *Journal of Material Processing Technology* 200(1–3): 94–105.
- Branland, N.; Meillot, E.; Fauchais, P.; Vardelle, A.; Gitzhofer, F.; Boulos, M. 2006. Relationships between microstructure and electrical properties of RF and DC plasma-sprayed titania coatings, *Journal of Thermal Spray Technology* 15(1): 53–62.
- Brossard, S.; Munroe, A. T. T.; Hyland, M. M. 2010. Study of the splat formation for plasma sprayed NiCr on aluminum substrate as a function of substrate condition, *Surface and Coatings Technology* 204(16–17): 2647–2656.
- Chen, Y.; Liang, X.; Liu, Y.; Xu B. 2009. Numerical analysis of the effect of arc spray gun configuration parameters on the external gas flow, *Journal of Materials processing technology* 209(18–19): 5924–5931.
- Chen, S.; Xiang, J.; Huang, J.; Zhao, X. 2015. Microstructures and properties of double – ceramic – layer thermal barrier coatings of La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/8YSZ made by atmospheric plasma spraying, *Applied Surface Science* 340: 173–181.
- Cheng, D.; Xu, Q.; Lavernia, E. J.; Trapaga, G. 2001. The effect of particle size and morphology on the in-flight behavior of particles during high-velocity oxyfuel thermal spraying, *Metallurgical and Materials Transactions B* 32(3): 525–535.
- Chromik, R. R.; Goldbaum, D.; Shockley, J. M.; Yue, S.; Irissou, E.; Legoux, G.; Randall, N. X. 2010. Modified ball bond shear test for determination of adhesion strength of cold spray splats, *Surface and Coatings Technology* 205(5): 1409–1414.
- Davim, P. 2012. *Materials and Surface Engineering, Research and Development*. Woodhead Publishing Limited: 121–162.
- Davis, J. R. 2004. Handbook of thermal spray technology, *ASM International*: 47–232.
- Dorfman, M.; Sharma, A. 2013. Commentary, challenges and strategies for growth of thermal spray markets: the six-pillar plan, *Journal of Thermal Spray Technology* 22(5): 559–563.
- Espallargas, N. 2015. *Future Development of Thermal Spray Coatings – Types, Designs, Manufacture and Applications*. Woodhead Publishing: 19–39.
- Fang, J. C.; Xu, W. J. 2002. Plasma spray forming, *Journal of Materials Processing Technology* 129: 288–293.
- Fang, J. C.; Xu, W. J.; Zhao, Z. Y. 2005. Arc spray forming, *Journal of Materials Processing Technology* 164–165: 1032–1037.
- Fang, J.-Y.; LI, Z.-X.; Jiang, J.-M.; Shi, Y.-W. 2007. Difference in particle characteristics and coating properties between spraying metallic and ceramic powder cored wires, *Transaction of Non-ferrous Metals Society of China* 17(3): 537–542.
- Farrell, R.; Horner, E. 2007. Metal Cleaning, *Metal Finishing* 105(10): 86–97.
- Fauchais, P. L.; Heberlein, J. V. R.; Boulos, M. 2014. *Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London: 2–253.
- Fauchais, P.; Heberlein, J.; Boulos, M. 2014. *Thermal Spray Fundamentals*. Springer, NY USA: 1489–1550.
- Friesen, E. 2010. Analyse des Zusammenhangs zwischen Mikrostruktur und tribologischen Eigenschaften termisch gespritzter Verschleißschuttschichten, *Schriftenreihe Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen* 19: 2–10.
- Froning, M.; Ruggiero, P. F.; Bajan, R. 2008. Thermal spray techniques for deep bore applications, *Welding Journal (Miami, Fla)* 87: 34–38.

- Fuchs, F. J. 19 – Ultrasonic cleaning and washing of surfaces. Edited by Gallego, J., and Graff, K. F. 2014. *Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound*. Elsevier Science Ltd.: 577–609.
- Gao, J.-G.; Tang, Z.-H.; Wang, C.-L.; Guo, M.-Q.; Cui, Y.-J. 2015. Microstructure, mechanical and oxidation characteristics of detonation gun and HVOF sprayed MCrAlYX coatings, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China* 25(3): 817, 823.
- Gärtner, F.; Stoltenhoff, T.; Schmidt, T.; Kreye, H. 2006. The cold spray process and its potential for industrial applications, *Journal of Thermal Spray Technology* 15(2): 223–232.
- Gedzevičius, I.; Valiulis, A. V. 2003. Influence of the particles velocity on the arc spraying coating adhesion, *Materials science* 9(4): 334–337.
- Gozali, E.; Mahruk, M.; Gu, S.; Kamnis, S. 2015. Numerical investigation on effects of nanoparticles on liquid feedstock behavior in High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) suspension spraying, *Surface and Coatings Technology* 280: 370–377.
- Greving, D. J.; Shadley, J. R.; Rybicki, E. F. 1994. Effects of coating thickness and residual stresses on the bond strength of ASTM C633-79 thermal spray coating test specimen, *Journal of Thermal Spray Technology* 3(4): 371–378.
- Griškonis, E.; Šulčius, A. 2008. *Metų ir plastikų paviršiaus paruošimas ir dengimas*. Vilnius, Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla: 82–85.
- Guan, Y. C.; Ka Lai Ng, G.; Zheng, H. Y.; Hong, M. H.; Hong, H.; Zhang, Z. 2013. Laser surface of carbonaceous deposits on diesel engine pistone, *Applied surface Science* 270: 526–530.
- Hadad, M.; Hitzek, R.; Buegler, P.; Rohr, L.; Siegmann, S. 2007. Waer performance of sandwich structured WC-Co-Cr thermally sprayed coatings using different intermediate layers, *Wear* 263: 691–699.
- Hermanek, F. J. 2001. Thermal Spray Terminology and Company Origins, *Journal of Thermal Spray Technology* 19(6): 1218–1223.
- Hermanek, F. J. 2001. *Thermal Spray Terminology and Company Origins*. ASM International, Materials Park, OH, USA: 59–150.
- Yang, X.; Zhao-hui, C.; Feng, C. 2014. High-temperature protective coatings for C/SiC composites, *Journal of Asia Ceramic Societies* 2(4): 305–309.
- Yazid, F.; Mebdoua, Y.; Lahmar, H.; Djeraj, S.; Benbahouche, S. 2014. Adhesion of FeCrNiBSi–(W–Ti)C wire-arc deposited coatings onto carbon steel substrates determined by indentation measurements and modeling, *Surface and Coatings Technology* 268: 310–316.
- Ivosevic, M.; Cairncross, R. A.; Knight, R. 2006. 3D predictions of thermally sprayed polymer splats: Modeling particle acceleration, heating and deformation on impact with a flat substrate, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49: 3285–3297.
- Jacobs, L.; Hyland, M.; DeBonte, M. 1997. Comparative study of WC-Cermet coatings sprayed via HVOF and the HVAF process, *Journal of Thermal Spray Technology* 7(2): 213–218.
- Jacobs, L.; Hyland, M.; DeBonte, M. 1998. Wear Behaviour of HVOF and HVAF Sprayed WC-Cermet Coatings, in *Proceedings of the 15 th Thermal Spray Conference*. France: 169–174.
- Jandin, G.; Liao, H.; Feng, Z. Q.; Coddet, C. 2003. Correlations between operating conditions, microstructure and mechanical properties of twin wire arc sprayed steel coatings, *Materials Science and Engineering A* 349(1–2): 298–305.
- Jankauskas, J.; Kazragis, A.; Kerienė, J.; Tamulaitienė, B.; Zalieckienė, E. 2008. *Bendroji chemija. Teoriniai pagrindai ir uždaviniai*. Vilnius, Technika: 182–196.
- Kelkar, M.; Hussary, N.; Schein, J.; Heberlein, J. 1998. Optical Diagnostics and Modeling of Gas and Droplet Flow in Wire Arc Spraying. *ITSC–1998*. Nice, France: 329–334.

- Krenevičius, A.; Leonavičius, M. K. 2007. *Eksperimentinė medžiagų mechanika, mokomoji knyga*. Vilnius, Technika: 7–12.
- Kulikauskas, L. 1997. *Medžiagotyra. Konstrukcinės medžiagos*. Vilnius, Žara: 441–461.
- Legoux, J. G.; Bouaricha, S. 2002. Evaluation of starting material and process parameters for HVOF WC-10Co-4Cr coatings, in *International Thermal Spray Conference*. Essen, Deutschland: 289–294.
- Li, C.-J.; Yang, G.-J.; Wang, Z. 2003. Formation of nanostructured TiO₂ by flame spraying with liquid feedstock, *Materials Letters* 57(13–14): 2130–2134.
- Liu, J.; Yang, S.; Xia, W.; Jiang, X.; Gui, C. 2016. Microstructure and wear resistance performance of Cu–Ni–Mn alloy based hardfacing coatings reinforced by WC particles, *Journal of Alloys and Compounds* 654: 63–70.
- LST EN 582. *Terminis užpurškimas. Tempiamojo adhezijos stiprio nustatymas*. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2001. 8 p.
- Lugbauer, M.; Kroll Busatis, A.; Badisch, E.; Polak, R.; Franek, F. 2006. Thermal Sprayed Coatings in High-performance Agricultural Machinery: Properties and Wear – Behaviour Test Routine, *Science, Innovation, and Application, ASM International*: 1345–1350.
- Ma, W.; Dong, H. Y.; Guo, H. B.; Gong, S. K.; Zheng, X. B. 2010. Thermal cycling behavior of La₂Ce₂O₇/8YSZ double – ceramic – layer thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spraying, *Surface coating technology* 204: 3366–3370.
- Marchand, C.; Verdelle, A.; Mariaux, G.; Lefort, P. 2008. Modelling of the plasma spray process with liquid feedstock injection, *Surface and Coatings Technology* 202(18): 4458–4464.
- Marcinauskas, L.; Kavaliauskas, Ž.; Kėželis, R. 2015. Formation of carbon composite coatings by plasma spraying, *Vacuum* B 122: 326–331.
- Matthews, S.; James, B.; Hyland, M. 2009. The Role of Microstructure in the High Velocity Erosion of Cr₃C₂-NiCr Thermal Spray Coatings: Part 1 – As-Sprayed Coatings, *Surface and Coatings Technology* 203: 1086–1093.
- Meletis, E. I.; Nie, X.; Wang, F. L.; Jiang, J. C. 2002. Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces, *Surface and Coatings technology* 150(2–3): 246–256.
- Minisandram, R. S.; Forbes Jones, R. M.; Kelkar, K. M.; Patankar, S. V.; Carter, W. T. 2002. Prediction of thermal history of performs produced by the clean metal spray forming process, *Materials Science and Engineering A* 324(1): 184–193.
- Murthy, J. K. N.; Venkataraman, B. 2006. Abrasive Wear Behaviour of WC–CoCr and Cr₃C₂–20 (NiCr) Deposited by HVOF and Detonation Spray Processes, *Surface and Coatings technology* 200(8): 2642–2652.
- Newbery, A. P.; Grant, P. S. 2000. Droplet splashing during arc spraying of steel and the effect on deposit microstructure, *Journal of Thermal Spray Technology* 9(2): 250–258.
- Oksa, M.; Turunen, E.; Suhonen, T.; Varis, T.; Hannula, S.-P. 2011. Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications, *Coatings* 1(1): 17–52.
- Paredes, R. S. C., Amico, S. C., d'Oliveira, A. S. C. M. 2006. The effect of roughness and pre-heating of the substrate on the morphology of aluminium coatings deposited by thermal spraying, *Surface & Coating technology* 200: 3049–3055.
- Pawlowski, L. 2008. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Second ed.* Wiley, West Sussex: 18–94.

- Poirier, D.; Legoux, J.-G.; Lima, S. 2013. Engineering HVOF-Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coatings: The Effect of Particle Morphology and Spraying Parameters on the Microstructure, Properties and High Temperature Wear Performance, *Journal of Thermal Spray Technology* 22: 280–289.
- Prchlik, L.; Sampath, S.; Gutleber, J.; Bancke, G., & Ruff, A. W. 2001. Friction and wear properties of WC-Co and Mo-Mo₂C based functionally graded materials, *Wear* 249(12): 1103–1115.
- Qian, M.; Froes, H. F. 2015. *Titanium Powder Metallurgy*. Elsevier: 425–466.
- Raessi, M.; Mostaghimi, J.; Bussmann, M. 2006. Effect of surface roughness on splat shapes in the plasma spray coating process, *Thin Solid Films* 506–507: 133–135.
- Redjal, O.; Zaid, B.; Tabti, M. S.; Henda, K.; Lacaze, P. C. 2013. Characterization of thermal flame sprayed coatings prepared from FeCr mechanically milled powder, *Journal of Materials Processing technology* 213(5): 779–790.
- Redjal, O.; Zaid, B.; Tabti, M. S.; Henda, K.; Lacaze, P. C. 2013. Characterization of thermal flame sprayed coatings prepared from FeCr mechanically milled powder., *Journal of Materials Processing Technology* 213(5): 779–790.
- Renzhong, H.; Ma, W.; Hirotaka, F. 2014. Development of ultra-strong adhesive strength coatings using cold spray, *Surface and Coatings Technology* 258: 832–841.
- Rico, A.; Gómez-García, J.; Múnez, C. J.; Poza, P.; Utrilla, V. 2009. Mechanical properties of thermal barrier coatings after isothermal oxidation. Depth sensing indentation analysis, *Surface & Coatings Technology* 203: 2307–2314.
- Sampath, S.; Jiang, X. 2001. Splat formation and microstructure development during plasma spraying: deposition temperature effects, *Materials Science and Engineering A* 304–306(1): 144–150.
- Sancakoglu, O.; Urgan, G.; Celik, E.; Aksoy, A. 2015. Fabrication of Cr-Cr₂₃C₆/Cr₂N Composite Coatings: Change in the Phase Structure and Effect on the Corrosion Properties, *International Journal of Applied Ceramic Technology* 12(4): 830–836.
- Santa, J. F.; Espitia, L. A.; Blanco, J. A.; Romo, S. A.; Toro, A. 2009. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings, *Wear* 267(1–4): 160–167.
- Santana, Y. Y.; Renault, P. O.; Sebastiani, M.; La Barbera, J. G.; Lesage, J.; Bemporad, E.; Le Bourhis, E.; Puchi-Cabrera, E. S.; Staia, M. H. 2008. Characterization and residual stresses of WC-Co thermally sprayed coatings, *Surface & Coatings Technology* 202: 4560–4565.
- Serapinas, V. 1999. *Tribologiniai procesai kinematinėse porose*. Kaunas, Kauno technologijos universitetas: 344–362.
- Sevostianov, I.; Kachanov, M.; Ruud, J.; Lorraine, P.; Dubois, M. 2004. Quantitative characterization of microstructures of plasma - sprayed coatings and their conductive and elastic properties, *Materials Science and Engineering A* 386(1–2): 164–174.
- Skopp, A.; Kelling, N.; Woydt, M.; Berger, L.-M. 2007. Thermally sprayed titanium suboxide coatings for piston ring/cylinder liners under mixed lubrication and dry-running conditions, *Wear* 262(9–1): 1061–1070.
- Stewart, S.; Ahmed, R.; Itsukaichi, T. 2005. Rolling contact fatigue of post-treated WC-NiCrBSi thermal spray coatings, *Surface & Coatings Technology* 190(2–3): 171–189.
- Sundar, M.; Whitehead, D.; Mativenga, P. T.; Li, L.; Cooke, K. E. 2009. Excimer laser decoating of chromium titanium aluminium nitride to facilitate re-use of coating tools, *Optics & laser technology* 41: 938–944.
- Šulčius, A. 2006. *Metaly korozija ir apsauga*. Kaunas, Kauno technologijos universitetas: 16–172.
- Tillmann, W.; Adubulgader, M. 2011. Particle size distribution of the filling powder in cored wires: Its effect on arc behavior, in – flight particle behavior, and splat formation, *Journal of the thermal spray technology* 21(3–4): 706–718.

- Valiulis, A. V. 2005. *Naujos medžiagos*. Vilnius, Technika: 80–98.
- Valiulis, A. V. 2012. *Pažangios inžinerinės medžiagos: savybės, gamyba ir taikymas*. Vilnius, Technika: 22–30.
- Varis, T.; Bankiewicz, D.; Yrjas, P.; Oksa, M.; Suhonen, T.; Tuurna, S.; Ruusuvaori, K.; Holmström, S. 2014. High temperature corrosion of thermally sprayed NiCr and FeCr coatings covered with a KCl-K₂SO₄ salt mixture, *Surface and Coatings Technology* 11: 235–243.
- Vilys, J.; Tamulevičius, S.; Grigaliūnas, V.; Meškinis, Š.; Guobienė, A. 2007. *Paviršiaus inžinerija ir nanotechnologijos*. Kaunas, Vitea Litera: 59–255.
- Wang, H.; Wang, X.; Song, X.; Liu, X.; Liu, X. 2015. Sliding Wear Behavior of nanostructured WC-Co-Cr coatings, *Applied Surface Science* 355: 453–460.
- Wang, T.-G.; Liu, Y.; Wang, Q.; Gong, J.; Sun, C.; Kim, K. H. 2012. Influence of residual stress on the adhesive behavior of detonation gun sprayed WC–Co coatings, *Current Applied Physics* 12(2): S59–S62.
- Wang, Z.; Yaran, N.; Hu, C.; Li, H.; Zeng, Y.; Zheng, X.; Ren, M.; Sun, J. 2015. High temperature oxidation resistance of metal silicide incorporated ZrB₂ composite coatings prepared by vacuum plasma spray. *Ceramics International*. 41(10) B: 14868–14875.
- Wank, A.; Wielage, B.; Pokhmurska, H.; Friesen, E.; Reisel, G. 2006. Comparision of hardmetal and chromium coatings under different tribological conditions, *Surface & Coatings Technology* 201: 1975–1980.
- Widgery, D. 1994. *Tubular Wire Welding*. Woodhead Publishing Limited: 2–38.
- Wielage, B.; Wank, A.; Pokhmurska, H.; Grund, T.; Rupprecht, C.; Reisel, G.; Friesen, E. 2006. Development and trends in HVOF spraying technology, *Surface & Coatings Technology* 201: 2032–2037.
- Xu, Z. H.; He, L. M.; Mu, R. D.; He, S. M.; Huang, G. H.; Cao, X. Q. 2010. Double-ceramic-layer thermal barrier coatings based on La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/ La₂Ce₂O₇ deposited by electron beam-physical vapor deposition, *Applied Surface Science* 256(11): 3661–3668.
- Xu, Z.; He, L.; Mu, R.; Zhong, X.; Zhang, Y.; Zhang, J.; Coa, X. 2009. Double - ceramic layer thermal barrier coatings of La₂Ce₂O₇/YSZ deposited by electron beam - physical vapor deposition, *Journal of Alloys and Compounds* 473: 509–515.
- Zhang, X. C.; Xu, B. S.; Xuan, F. Z.; Tu, S. T.; Wang, H. D.; Wu, Y. X. 2009. Porosity and effective mechanical properties of plasma-sprayed Ni-based alloy coatings, *Applied Surface Science* 255(8): 4362–4371.
- Zhu, C.; Wang, Y. G.; An, L. N.; Javed, A.; Xiao, P.; Liang, G. Y. 2015. Microstructure and oxidation behavior of conventional and pseudo graded NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings produced by supersonic air plasma spraying process, *Surface and Coatings technology* 272: 121–128.
- Zimmermann, S.; Gries, B.; Fischer, J. 2008. New health and environment – friendly iron based materials employed as binder for carbide powders used in thermal spraying, in *Proceedings of the 2008 International Thermal Spray Conference*. Maastricht, Niederlande: 965–970.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Gargasas, J.; Gedzevičius, I.; Nagurnas, S. 2011. Termiškai purkštų dangų tyrimas ultragarsiniais metodais, *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba* 3(6): 75–78. ISSN 2029-2341 (Academic Search Complete, IndexCopernicus).

Gargasas, J.; Valiulis, A. V., Gedzevičius, I.; Mikaliūnas, Š. 2013a. Elektrolankinio purškimo būdu užpurkštų dangų technologinių savybių tyrimai, *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba = Mechanics, material science, industrial engineering and management* 5(6): 620–624. ISSN 2029-2341 (Academic Search Complete, IndexCopernicus).

Gargasas, J.; Valiulis, A. V.; Gedzevičius, I.; Pokhmurska, H. 2013b. The research of thermal arc sprayed coatings tribological properties by using rubber wheel test, *Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials VI* 220–221: 693–697. ISBN 9783038352273 (Scopus, INSPEC).

Gargasas, J.; Valiulis, A. V.; Gedzevičius, I. 2015. Experiential learning-creation and testing of sprayed coatings, *World transactions on engineering and technology education (WTE&TE)* 13(3): 368–371. ISSN 1446-2257.

- Gedzevičius, I.; Gargasas, J.; Pokhmurska, H.; Wielage, B.; Lampke, T.; Rosert, R.; Червінська, Н. 2014a. Зносо- і корозійна тривкість електродугових покриттів, напилених порошковими дротами серії Stein-Mesyfil, *Physicochemical mechanics of materials* = *Фізико-хімічна механіка матеріалів: international scientific-technical journal / National Academy of Sciences of Ukraine* Lviv: H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute 50(6): 124–128. ISSN 0430-6252.
- Gargasas, J.; Gedzevičius, I.; Valiulis, A. V.; Pokhmurska, H.; Grund, T.; Wielage, B. 2013c. Wear behavior and performance of coatings arc sprayed with cored wires, *Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen. Band 50: Tagungsband zum 16. Werkstofftechnischen Kolloquium und zur 10. Industriefachtagung „Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik“ in Chemnitz*: 374–380. ISSN 1439-1597, ISBN 9783000431296.

Straipsniai kituose leidiniuose

- Gargasas, J.; Valiulis, A. V.; Gedzevičius, I.; Pokhmurska, H.; Wielage, B.; Lampke, T.; Rosert, R. 2014b. The research of arc sprayed coatings tribological properties, *International thermal spray conference and exposition, ITSC 2014*, Barcelona/Spain: 302. ISBN 9783871555749: 860–865.

Summary in English

Formulation of the problem

There are many ways to improve the surface quality. A separate group is the thermal spraying technologies. The industry which applies thermal spray processes and materials allows to obtain coatings best suited to the specific operating conditions of the product. The variety of thermal spray processes and materials used in the industry allows to make coatings which are most suitable to the specific exploitation conditions of the product. Material group of spraying has a specific scope, so the surface must have a certain structure and properties to maximize the performance requirements. The new created materials must be tested and analyzed in order to find their suitability for use.

The performance of surface coatings is highly dependent on the surface structure and internal defects. The coatings of thermal spraying lead to the formation of a variety of factors that together are very important for achieving optimum properties of the coating. The thermal spray materials' chemical composition, spraying technologies and the compatibility of properties of the made coatings are not sufficiently studied yet and it is hard to predict the optimal properties of the made surfaces in particular working environments.

The relevance of the thesis

There are many studies made on thermal spraying and new modified materials for spraying in the world recently. This work aims are to investigate created new wires suitability for

metal surfaces sprayed by thermal arc. The mechanical, tribological, and corrosive properties of coatings must be assessed, after the replacing of currently being used materials in the industry which are less cost-effective. The modern technologies enable to improve and replace the expensive and rare metals with much cheaper ones, without compromising or even improving the structural integrity and durability of constructions. This saves cost and conserves natural resources in production. Foremost the new spraying substances must be created for the coatings distinguished for their special properties objectively being competitive by their physical, economical and technological parameters to the substances that are already used. The performance of coatings is highly dependent on the injection materials, technology of spraying material, melting temperature, the molten particle size and shape. The properties of coatings' structure depend not only on the chemical composition of wires, but also on the spraying process parameters. The main aim is to create the coatings by using thermal arc spraying, which will have very high strength, hardness, resistance to abrasion also they will be ductile and will not lose the useful properties even if deformed. In order to reach this goal the new materials are created with different configurations of substances, which in the process of melting compose metallic, carbide, and other compounds that provide the necessary properties for the coating without any heat treatment after spraying. The dissertation presents a study with the created new spray materials involving multiple criteria assessment in order to find out the technological peculiarities of the spraying process, and to create the surfaces with optimal physical, morphological, tribological, and anticorrosion properties which would be widely used in industrial production

The object of the research

New materials for cored wires were created for thermal arc spraying and used for spraying Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr-Mo and Fe-Mn-Cr system alloy coatings.

The aim of the thesis

To create and investigate iron-based cored wires, for thermal arc spraying, doped with Mn-Cr-Mo-Ni-Mn-Cr-Mo, Mn-Cr system alloying elements, which exhibit exceptional tribological properties of coatings determining the good performance. To identify the main technological parameters of the spraying parameters and properties of the coatings.

The objectives of the thesis

1. To create cored wires of new chemical composition in cooperation with a manufacturer of wires, which would be suitable for the spraying process and could change the current not so profitable wires for steel surface strengthening or restoration.
2. To estimate influence of flare particles on coatings' morphology.
3. To estimate influence of coatings' chemical composition and technological parameters on mechanical properties.

4. To estimate influence of coatings' technological parameters, morphology, chemical composition on corrosive resistance.
5. To explore coatings' resistance under conditions of dry, wet and sliding friction.

Research methodology

Experimental investigation methods were applied for evaluating the thermal arc spraying coatings obtained by the qualitative characteristics in the present research. The experimental cored thermal arc spraying wires were investigated in this work, developed by Vilnius Gediminas Technical University and technologists of Germany's concern *Drahtzug Stein*. Using thermal arc spraying technology the wires were used for the coatings. The experiments were carried out in two steps, in the scientific laboratories of Vilnius Gediminas Technical University and the French Belfor – Montbeljareo Technology University. The tribological investigation and 3D surface profilometry was made in Germany Chemnitz Technical University, in the materials and surface engineering scientific laboratories. Tribological properties of coatings were evaluated in accordance with ASTG 65 – 04, ASTM 75 – 07 standards. Also coatings were evaluated according to sliding wear test. The corrosion properties of coatings were investigated by potentiometric dynamic corrosion tests in Ukraine Lviv Technical University. The structural investigation, porosity, hardness, modulus of coatings' elasticity and oxide inclusions evaluation were done in Vilnius Gediminas Technical University laboratories.

Scientific novelty of the thesis

In course of development of the dissertation, the following new results for material engineering were obtained:

1. The new cored wires with different chemical composition of the powder were created for thermal arc spraying suitable for steel surface enhancement or restoration.
2. It was investigated Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr-Mo and Fe-Mn-Cr coatings alloying systems mechanical, tribological and adhesive, properties for coatings.
3. Close relations of coatings' microstructure, adhesive, mechanical, tribological, and anticorrosive properties with the spraying parameters were estimated.
4. When changing the parameters it would be possible to reach optimal adaptation to the specific operating conditions of explored coatings.

The practical value of the research findings

There were created four cored wires for thermal arc spraying, containing an alloying element in spraying forms of chromium, manganese and other elements, increasing the product (part) surface resistance to abrasive friction. Wires can be used in industry and are currently being used to replace more expensive spraying materials.

The investigation results can be used in determining the thermal arc spraying technological parameters' influence on the obtained coatings' mechanical, physical and tribological properties, and by adjusting the spray parameters it is possible to obtain coatings that meet the requirements of specific operating conditions.

The defended statements

1. The spraying current influences the molten flare particles' size, and this technological parameter has an effective impact on sprayed coatings morphology and their qualitative characteristics.
2. The $\text{Cr}_{22.23}\text{Fe}_{0.77}\text{C}_6$, Cr_7C_3 and Mn_7C_3 carbides which emerge in the coatings influence the hardness, corrosive, tribological properties of the coatings under conditions of wet, dry and sliding friction.

The approval of the research findings

7 scientific papers on the subject of the dissertation were published: six of them appeared in publications of other international database and one of them – in the reviewed materials of reports at the conference. The results of the research described in the dissertation were presented at thirteen scientific conferences in Lithuania and abroad.

The structure of the dissertation

The dissertation includes the introduction, three chapters, general conclusions, list of references, list of author's publications and 3 annexes.

The volume of the work is 117 pages of the text (without annexes), containing 58 pictures, 16 tables and 5 numbered equations.

1. The analysis of the thermal spraying process and the features of forming coatings

Thermal sprayed metallic coatings are extensively used in different branches of engineering to protect the surface of components from wear, corrosion or to restore thickness of details. Thermal spray techniques are grouped according to the type of energy use. One of them is electric arc spraying. In the electric arc spray process (also known as the wire arc process) two consumable wire electrodes connected to a high – current direct-current (dc) power source are fed into the gun and meet, establishing an arc between them that melts the tips of the wires. The molten metal is then atomized and propelled toward the substrate by

a stream of air. The process is energy efficient because all input energy is used to melt the metal. The electric arc spraying is the low-cost process with high productivity regarding the preservation of the quality of sprayed layers. Spray rates are driven primarily by operating current and vary as a function of both melting point and conductivity. Electric arc spraying also can be carried out using inert gases or in a controlled – atmosphere chamber. Temperatures within the arc rise to 6500 °C. High temperature at the wire ends can cause a burning loss of alloying elements in the spray materials. For elements such as silicon or manganese, loss can rise to 40 %, for other elements, e.g. carbon, even up to 50 %. Adapted alloyed bulk or filled wires are therefore necessary.

Thermal sprayed metallic coatings are highly capable of improving the superficial wear resistance of industrial components. Wire filler materials, the specific processes and parameters predominantly influence the characteristics and hence the properties of the sprayed coatings. The filler material of wires can be vary various. Usually wires for thermal arc spraying have chromium content ranging from 1 to 5%. That choice is determined by the relatively small cost of wires and good mechanical properties of coatings.

Coatings consist of single, flattened particles of different size. There are pores, gas inclusions, unmelted wire material and other contaminations, cracks and interface delamination of different sizes and shapes in the coatings (depending on the specific spray process conditions and materials used). Thermal spray coating has homogenous structure. It may also contain oxide layers and inclusions between the splats. The oxide inclusions form as a result of oxidation of molten metal droplets while in-flight. The oxide layers between the splats are probably the result of both surface oxidation of the molten metal droplets in-flight, and continued oxidation of the splats on the surface as they solidify.

The process and feedstock variables influence such chemical and mechanical coating's properties as the chemical composition, microstructure, coating adhesion, and toughness profoundly. Therefore, the resulting friction and wear behavior of arc sprayed wear protection coatings are likewise influenced. In addition, the inhomogeneous microstructure of spray coatings strongly influence the coatings' wear behavior, too.

Spray materials and the spray process parameters mainly affect the characteristics and the properties of the sprayed coatings. Large varieties of thermally sprayed coatings were tested to estimate their resistance to dry friction.

2. The methodology of the thermal arc spraying coatings, research methods and materials used in work

The methods applied in the work were chosen in order to create, qualify and optimize the thermal arc spraying wires' chemical composition and coatings' spraying parameters striving to get coatings with good tribological, mechanical and corrosion properties.

The experiments were carried out using a Castolin – Eutectic EuTronic arc spraying system and Kemppi Pro 5200 welding machine. The "EuTronic Arc Spray Gun 4" gun with 7 mm diameter internal opening was used in the process of spraying. Spray distance was in a range of 170–190 mm. The processing parameters are shown in Table S1. The spray gas in each case was compressed air (pressure 5 MPa).

Table S1. Parameters for the thermal arc spraying

Wire	Current, A (-3 +7 A)	Voltage, V (± 1)	Wire	Current, A (-3 +7 A)	Voltage, V (± 1)
Fe-Mn-Cr-Mo	320	31	Fe-Mn-Cr	320	30
	350	34		350	36
	380	32		380	33
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni	320	31	Fe-Mn-Cr (22.61%)	320	30
	350	36		350	32
	380	38		380	32

Four unique chemical composition experimental cored wires for thermal arc spraying were used as the material, which were marked as Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr-Mo-Ni, Fe-Mn-Cr and Fe-Mn-Cr (22.61%Cr) in the dissertation. These wires were developed by Vilnius Gediminas Technical University doctoral student Justinas Gargasas and Germany's concern "Drachtzug Stein" manufacture company of wire solutions. The diameter of the wires was 1.6 mm. The chemical composition of the given feedstock wires is given in Table S2. All coatings were deposited on mild steel S235JR substrates and had a thickness from 890 μm to 1050 μm . Samples of 150 mm \times 25 mm were cut from the larger plates.

Table S2. Chemical composition of cored wires

Feedstock wire	Chemical composition (mass content, %) Fe balance					
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni
Fe-Mn-Cr-Mo	0.5	1.5	0.6	6.0	0.5	-
Fe-Mn-Cr-Mo-Ni	0.5	1.1	0.3	0.3	4.8	1.5
Fe-Mn-Cr	1.3	0.8	1.4	6.5	-	-
Fe-Mn-Cr (22.61%Cr)	2.0	0.8	0.26	22.61	-	-

The wall thickness of cored wire range were from 350 to 420 μm . The pictures of produced experimental wires are presented in Figure S1. The filler material in the wires are of unequal size, irregular and asymmetric shape. Average alloying particle size varies from a few μm to 150 μm . The particles of material show what size and shape unmelted particles can be expected to find in sprayed coatings, if it will be estimated in subsequent coatings' microstructures studies that not all particles of the wire melt and reach the sheathing substrate in a liquid state.

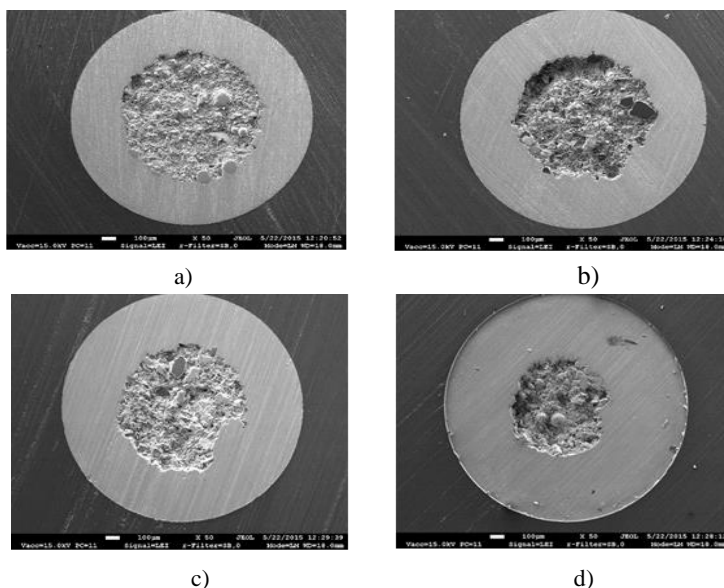


Fig. S1. The view of the thermal arc spray wires and the thickness of the steel plane: a) Wire Fe-Mn-Cr-Mo. Wall thickness of 350 μm ; b) Wire Fe-Mn-Cr-Mo-Ni. Wall thickness of 360 μm ; c) Wire Fe-Mn-Cr. Wall thickness of 416 μm ; d) Wire Fe-Mn-Cr (22.61%Cr). Wall thickness of 422 μm

Wear tests were performed with a standardized ASTM G65 – 04 dry-sand rubber-wheel tester (3-body abrasion). The rubber wheel was in contact with a specimen under an applied load. A flow of sand particles was directed to the gap between a rotating rubber wheel and the specimen. The sand particles scratched the surface of the specimen under the applied load at a sliding speed of $w \times R$, where w is the angular speed of the rubber wheel and R is its radius. In the study silica sand with the average grain size of 300 μm was used. It was fed at a flow rate of 300 to 400 g/min, as recommended by ASTM standard for the dry sand in a rubber wheel abrasion test. The specimens for the wear test had a size of 40×25×3 mm. Wear loss of a specimen was evaluated by measuring the mass loss of the specimen after 1000 wheel revolutions corresponding to the sliding distance of 718 m wear track length. The weight losses were converted to volume loss according to the measured coatings' specific density. Specimens were tested three times according to each standard to gain an average mass and respectively an average volume loss. The mass loss was calculated according to the weight loss and the theoretical density of the coatings.

Other wear test performed was ASTM G75–07 standard – Miller test. The relative effect of slurry abrasivity in the Miller Number was determined by using the measured mass loss of a standard-shaped metal block, driven in a reciprocating motion by a rotating crank, riding in the bottom of a tray containing the slurry. The samples were immersed in water with corundum and polished with 22.24 N dead load. The drive mechanism provided a horizontal reciprocating harmonic motion to the block arm of 200 mm travel. This test

ended after 8 hours, the coatings' mass loss was measured each 2 hours, and it gave essentially equivalent results.

The wear resistance of the coatings was estimated by sliding wear test using "Tribo-meter SVT 40" and two types of 10 mm diameter indenter: hardened metal ball (820 HV) and ceramic ball (1310 HV). Coatings were tested for 1 hour in room temperature.

The coating roughness parameters were measured with "Hommelwerke LV-50 E machine. Ra roughness of the coatings was evaluated.

The microstructure of obtained coatings was investigated on the etched transverse cross-sections with optical microscope Olympus BXS and SEM EDAX scanning electron microscope equipped with energy dispersive (EDS) spectrometers for X-ray microanalysis. The SEM operating conditions were: 25 kV, 45 μ A. The phase analyses were done on SmartLab powder diffractometer equipped with X-Pert goniometer. Graphite-monochromatized Cu K α ($\lambda = 0.1541837$ nm) radiation was used in all examined cases. Experimental conditions were as follows: voltage – 40 kV; current – 40 mA; angle range $2\theta - 15 - 80^\circ$; step $\Delta 2\theta - 0.02^\circ$; exposure time per step – 1 °/min, temperature 25 °C. Measurements were performed on the polished tops of coatings. Microhardness measurements were carried out by Knoop and microvickers methods, using Zwick Roell ZH μ tester with different loads of 100 g and 300 g (exposure time 10 s) with 1% error of measurement. Measurements were performed on the polished and etched transverse cross-sections of remelted coatings. Electrochemical corrosion tests were accomplished with potentiostatic/galvanostatic analyzer. Electrochemical coatings' measurements were carried out in a special chamber with coating, gauge plate and auxiliary electrode. As a gauge the mercury chloride electrode immersed in NaCl solution was used. When measuring as an auxiliary electrode the platinum wire was chosen. 3.4% NaCl solution was used in the tests. Measurements were performed on the polished tops of coatings.

The adhesion tests were implemented according to LST EN ISO 582:2001 standard.

The oxide and porosity inclusions in the coatings were evaluated using the „Scion Image“ program. All the obtained results were processed using the program package „Microsoft Office Excel 2010“.

3. The investigation and analysis of the properties of the thermal arc sprayed coatings

The third chapter of dissertation includes results obtained by microstructural, mechanical, corrosion and tribological studies of sprayed coatings, and their discussion.

The particle size studies of sprayed liquid metal droplets have been carried out by SEM microscopy. The morphology and microstructure of the metal droplets are presenting on Fig. S2–S5. Nominally droplets consist of irregular spherical shape, some particles are not melted it consist up to 1 %. Droplets diameter are from 20.8 μ m to 9.2 μ m. The images show that the particle formation is influenced by the parameters used in the thermal arc spraying. Using low spraying current (320 A) forming large droplets, by increasing the

current they get smaller. Smallest melted droplets produced with 380 A current. Also thermal spray wire remaining filler is different granulation. This can influence and determine the particle size of the molten coatings.

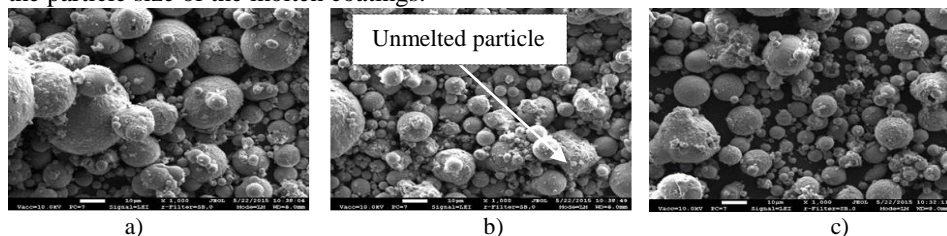


Fig. S2. Melted droplets of the Fe-Mn-Cr-Mo wire: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

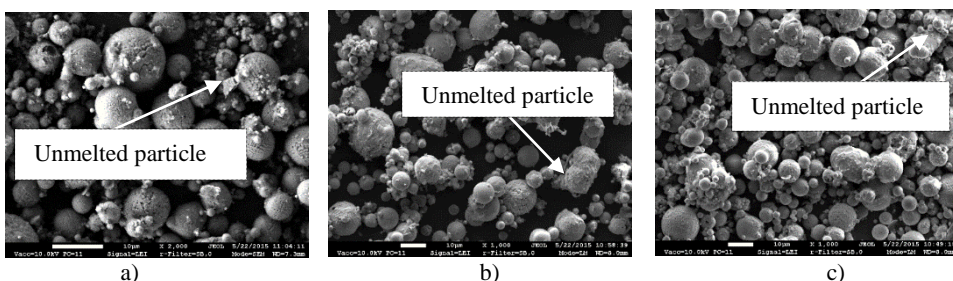


Fig. S3. Melted droplets of the Fe-Mn-Cr-Mo-Ni wire: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

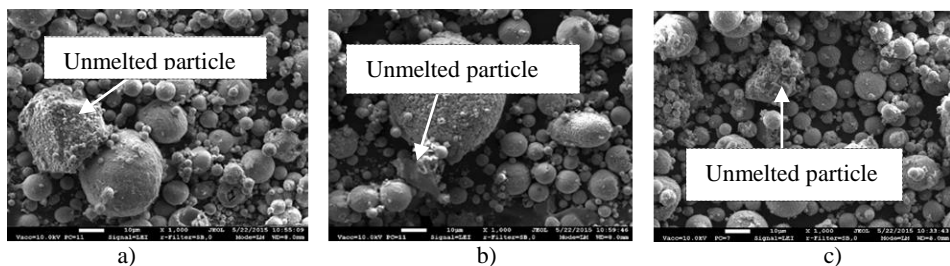


Fig. S4. Melted droplets of the Fe-Mn-Cr wire: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

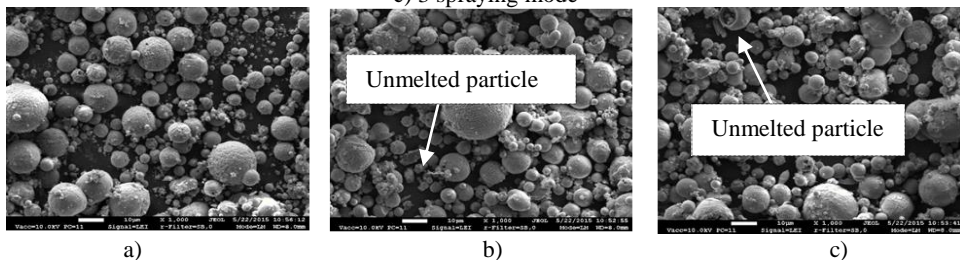


Fig. S5. Melted droplets of the Fe-Mn-Cr (22.61%Cr) wire: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

The crystallization structure on the molten particle's surface is seen (Fig. S6) by using the higher magnification of SEM microscopy.

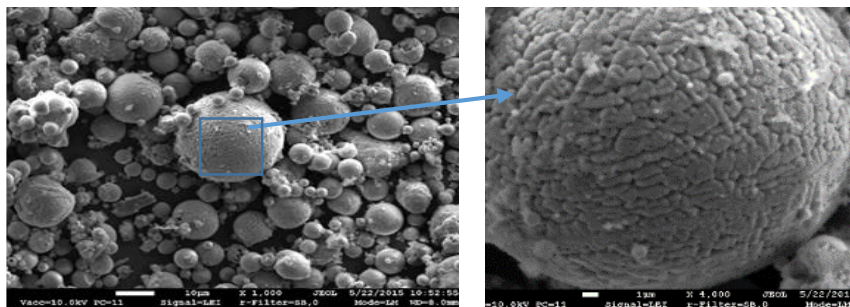


Fig. S6. The dendritic structure of the primary crystallization on the particle layer

SEM microscopy investigation of microstructures showed the amount of porosity in coatings. The lamellas are quite large in the coatings, around them in some areas are located emptiness – pores. The shape of lamella is very similar when all coatings are exposed to 320 A spraying current. The shape of lamella begins to change after increasing of the spraying current. The lamella become much more smaller and thinner in the coatings using 350, 380 A current. A boundary was determined between molten particle formation and the layer forming unit. The analysis of collected flare particles has shown that when spraying cored wires particles in flare are uneven and have different plastic deformation during percussion with surface. The size of sprayed particle is determined by the coating's morphology. At 20.8 μm particle average size of the average lamella height is 5 μm , length 200 μm . When the particle size is reduced to 9.2 μm , lamella height is reducing to 2 μm and a length becomes 180 μm , the lamella becomes smaller.

The small melted drops of molten wire are rapidly oxidised because the transporting gas is the compressed air. The particles are heated above the melting temperature and oxidize in the atmosphere. In the process of moving oxide films form on the surface of molten liquid metal particles, which pass into formed coating. So it means that around the melted particles large oxide inclusions appear. Analysing the contact line it was noticed that in juncture between the base metal and coating the relations form because of mechanical interaction and melting of base metal microroughness. In the analysis of base metal and coating contact line it was noticed that the coating is close fitting to the base and repeats its microrelief. In the contact line the pores were noticed, which composed because of microroughness of substrate, which were not filled with spraying droplets. Some pores' inclusions were observed in the line of contact between coating and metal.

The Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) type of coatings were most distinguished from all coatings. There were detected vertical cracks in these coatings. These defects are the result of internal stress, which formed when the coatings began to cool. The chemical composition of the spraying had a significant impact on internal cracks too. This type of coatings had the highest chromium content, equal even to 22.61 %. With such quantity of chromium, small micro-cracks (which worsen the tribological properties of coatings) formed and

were connected with each other. The average size of the cracks in the coatings varied from $2\text{ }\mu\text{m}$ to $34\text{ }\mu\text{m}$. The Figure S7 shows micro cracks in the coatings of different spraying mode.

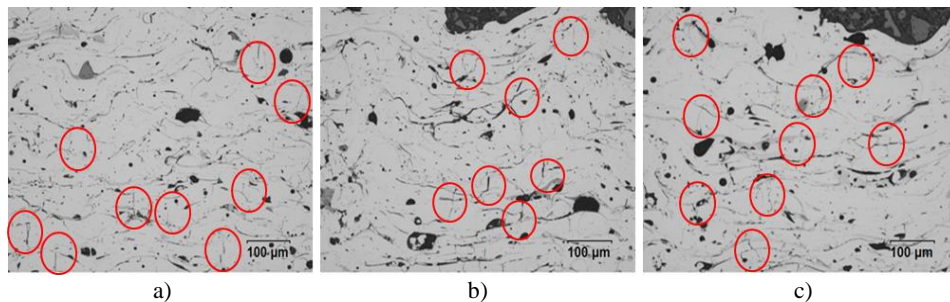


Fig. S7. The microstructures of the Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) type coatings with micro cracks: a) 1 spraying mode; b) 2 spraying mode; c) 3 spraying mode

The chromium carbides emerged in the surface of grains influenced the formation of microcracks in the Fe-Mn-Cr (22.61%) coatings. The $\text{Cr}_{22.23}\text{Fe}_{0.77}\text{C}_6$ carbides diffused into grains' edges. The carbide colonies formed here and destroyed interatomic binds between grains under strong internal strains. That carbide formation in the grains' edges was influenced by high melting temperature in the flare during the process of spraying and fast cooling of liquid metal, therefore microcracks start to form in the coatings

The individual phases and areas were determined by X-ray micro analysis using RMA method. The examination of the samples showed heterogeneous structure of the coating composition. It means that coatings were formed from components with different chemical composition parts. This is a typical structure of the thermal arc spraying coatings. The RMA investigation of different areas in the coatings showed the high carbon content. This can be explained by the fact that the investigated areas were formed of carbide compounds with the high carbon content. The atomic elements did not coincide with elements in the wire. It means that some chemical elements can burn in the thermal arc spraying process.

When comparing different RMA zones of Fe-Mn-Cr-Mo coating, it can be seen that the quantity of chromium differs in them by 1.7 time. It happens because melted small liquid metal droplets' alloyment is uneven when thermal arc spraying wire is melting. Percent quantity of alloyed elements declines since a part of elements burns during the process of thermal arc spraying. Quantity of chromium found in lammellae is approximately equal. Cr_7C_3 chromium carbide is formed, and there is plenty of oxide derivatives around it. The ferrum quantity in lamella is approximately equal.

RMA analysis in the Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coatings has showed that the microstructure is distinguished by its very similar chromium, nickel and molybdenum composition, as it is indicated in the chemical composition of wires, which is roughly equal to Cr 0.3%, Ni 1.5%, and Mo 4.8%. In the Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) and Fe-Mn-Cr coatings the investigated areas of lamella chemical composition was very similar chemical composition, as indicated in the chemical composition of the wires.

The quality compositional phase analysis (XRD) was done to find out what different phases were formed in the coatings. These studies were carried out for all coatings made with different spraying modes. There were found some carbides as $\text{Cr}_{22.23}\text{Fe}_{0.77}\text{C}_6$, in Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings. This carbide has very good tribological properties, so coatings with these carbides have very good tribological and mechanical properties. Cr_7C_3 carbides were detected in Fe-Mn-Cr coatings. Cr_7C_6 in carbides were detected in Fe-Mn-Cr-Mo coatings, only Mn_7C_3 carbides were fixed in Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coatings. X-ray microanalysis didn't show any significant difference between the different spraying mode in the coatings.

Adhesion of thermal arc sprayed coatings depends on the character of the coating and substrate contact surfaces. The stretch tests showed that the biggest part of samples (85%) had cracks in the coating, 15% in the glue (test tablets were glued to special rods) The data analysis showed that porosity reduces adhesion strength in the coatings. The tensile strength values are very similar: 27.5 MPa in the Fe-Mn-Cr-Mo coatings with 3.1% porosity when using (320 and 380 A current) spraying modes. The biggest strength values – 35.9 MPa – were measured in the same kind of coatings, exposed to spraying with 350 A current, then porosity was equal to 1.5%. The lowest adhesion values were measured in Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coatings: 21.1 MPa using (320 A), 23.8 MPa using (350 A) and 16.6 MPa using (380 A) spraying current. These coatings were characterized by the medium number of porosity in all spraying modes. The adhesion – cohesion strength was measured as equal to 24.7 MPa using (320 A), 32.6 MPa using (350 A) and 27.9 MPa using (380 A) spraying current in the Fe-Mn-Cr coatings.

The tensile strength values was 26.5 MPa in the Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings which were exposed to 320 and 980 A current spraying, i. e. the first and the third spraying modes. The biggest value of 37.5 MPa was obtained by 350 A current. It was 1.4 time higher value than in a coating made with the first and the third spraying mode. The adhesion value was ≈ 28 MPa with medium value of 3.1 % porosity in all coatings. The dependence of adhesion – cohesion strength and porosity is shown in Figure S8.

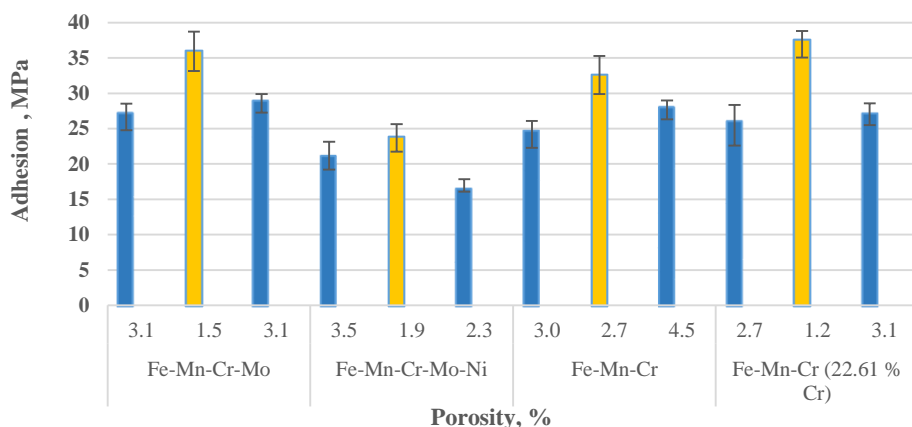


Fig. S8. Coatings' adhesion, cohesion strength dependence on porosity

It was found that adhesion values depend on the the thickness of the coatings (Table S3). The thickness ranges from 890 to 1050 μm in the coatings. The tensile strength decreases with increasing thickness of coatings. Adhesion and cohesion strength reaches $\approx 32\text{--}37$ MPa at 890 to 900 μm coating thickness and decreases by 17%, when coatings' thickness increases to 960–1050 μm .

It can be concluded that coating thickness and internal coating defects such as pores affect the adhesion between the substrate and the coating. The connection strength decreases between the lamella precarious grip, and reduces the metallic strength in sprayed coatings.

Table S3. The dependence of adhesion-cohesion values on coatings'

Coating/Spraying mode	Thickness of the coating, μm	Adhesion - cohesion, MPa	Coating/Spraying mode	Thickness of the coating, μm	Adhesion - cohesion, MPa
Fe-Mn-Cr-Mo			Fe-Mn-Cr-Mo-Ni		
1 mode	940	27.1	1 mode	990	21.1
2 mode	900	36.0	2 mode	960	23.7
3 mode	940	28.9	3 mode	1050	16.6
Fe-Mn-Cr			Fe-Mn-Cr (22.61 % Cr)		
1 mode	990	24.7	1 mode	940	26.0
2 mode	900	32.5	2 mode	890	37.5
3 mode	940	27.9	3 mode	940	27.1

Thermal arc sprayed coatings' porosity and quantity of oxides was estimated by analysis of digital images of microjoints which were made with graphic programme "Scion Image®". The lowest porosity and oxide inclusion were measured in the second spraying mode (350 A current) of all coatings. The optimal speed and spraying parameters were achieved with a standard spray nozzle using 350 A current compared to other spraying modes (320 and 380 A current). Lamella layers formed in coatings collapse gradually and form wafer-thin layer in which large pores don't form. When exposed to weaker spraying currents (320 A) obtained coatings have bigger quantity of pores and oxides, in comparison with the previous mode.

Hardness measurements results showed that the average coatings' hardness strongly depend on the coatings' chemical compositions and spraying parameters. The microhardness of sprayed coatings varies from 581.5 HV to 666.1 HV using 100 g load and from 462.4 HV to 501.3 HV using 300 g load in Fe-Mn-Cr-Mo type of coatings. It was the lowest hardness of all coatings. Significantly higher microhardness of coatings was set in the Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) type of coatings. These coatings' hardness varies from 1362 HV to 1479 HV. This has resulted in a large amount of chromium coatings, which formed $\text{Cr}_{22.23}\text{Fe}_{0.77}\text{C}_6$ carbide. These carbides have a very high hardness. The microhardness of other two coatings: Fe-Mn-Cr-Mo-Ni and Fe-Mn-Cr approximately was the same. It varies from 724.4 to 835.9 HV 0.1 in Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coatings and from

714.3 to 777.4 HV 0.1 in Fe-Mn-Cr coatings. The microhardness depends on the chemical composition of the wires and spraying mode. The differences of microhardness of the same coatings and applied difference load exist, which can be explained in this way: measurements using 100 g load the properties just of lamella, without pores, however measurement with 300 g load gives results of few lamella and inclusions of pores between the lamella.

To evaluate the caused impact of the obtained microstructure changes on the coatings behavior in corrosive environments, potentiodynamic polarization tests were carried out. It was established that the lowest resistance to corrosion was in the Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings there $E_{cor} = (-0.6295 \text{ V})$, (1 spraying mode). In this type of coatings $\text{Cr}_{22.23}\text{Fe}_{0.77}\text{C}_6$ carbides formed. In separate analysis of each coating, it is seen that in Fe-Mn-Cr-Mo coatings, polarization curves peaks are approximately equal ($-0.4897/-0.4868 \text{ V}$), the highest peak potential (-0.4943 V) was reached in the second spraying mode. Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coatings' which were sprayed in first spraying mode (320 A current) polarization curve peaks reached (-0.513 V) potential. This type of coating sprayed by second (350 A) and third (380 A) mode had the lowest (-0.4781 V) and (-0.4636 V) potential values. The potential difference between the modes is also minimal. In Fe-Mn-Cr coatings potential differences between different spray modes were the most prominent. The great potential value was obtained by spraying in the second mode (-0.536 V), the minimum value (-0.486) was received with the third spraying mode.

Evaluating of the coatings' surface roughness was carried out through the measurement of Ra parameter. The biggest roughness in Fe-Mn-Cr-Mo, Fe-Mn-Cr-Mo-Ni and Fe-Mn-Cr coatings was set in the first spraying mode. In Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings the biggest Ra values were in the third spraying mode, where 380 A current was used. In this type of coating was the biggest value of micro cracks. Also the divorced single lamella in the surface were discovered. Surface roughness measurements showed that the coatings are assigned to 3–4 smoothness class

The results of the wet and dry wear test of the coatings are presented in Figures S9 and S10. Almost all coatings of the second spraying mode have a good resistance to friction. A relatively smaller particles size can lead to the homogenization of load and thereby to reduction of particle fractures. This depends on the spraying mode parameters. The abrasive Rubber wheel test wear resistance measurements showed that the results of abrasion test can be directly correlated to the spraying parameters. It was established that Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) and Fe-Mn-Cr-Mo coatings have the best resistance to dry abrasion. Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings in all experiment time lost only 1.3% of their weight. The biggest weight loss was in Fe-Mn-Cr-Mo coatings, in the beginning of experiment, compared with other coatings, but later the mass loss stabilized and it was the same until the experiment ended. The biggest mass loss was in the Fe-Mn-Cr-Mo-Ni coatings. 199 mg weight loss was recorded. This type of coatings had the lowest adhesion and/or cohesive values. The sand particles wrest microparticles from the coating easiest, so the deterioration process was the most intensive in these coatings.

From the received data we have clear tendency that when porosity in the coatings increases, weight loss increases too. Under small porosity (1.2–1.5%) the coatings average weight loss is equal to 146 mg per 600 s cycle, which is for 1.3 times less then for the coatings with porosity of 4.3–4.6%.

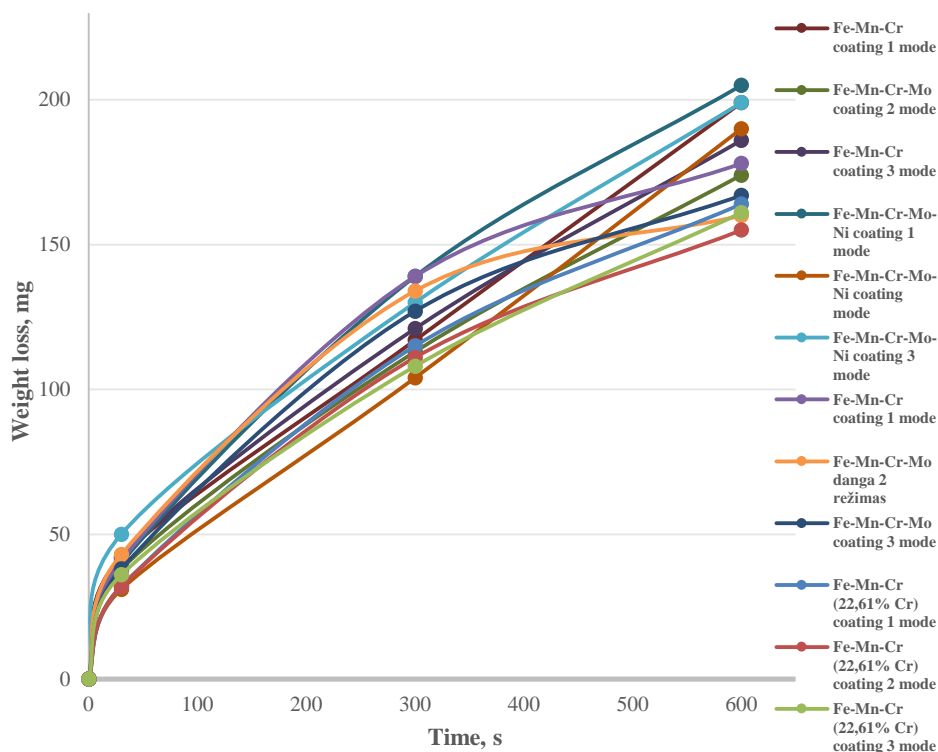


Fig. S9. The weight loss in the coatings after 600 s

The Miller test results showed that in the first hours of testing the coatings weight loss varies from 120 to 192 mg in all coatings. Except in the Fe-Mn-Cr-Mo coatings sprayed in 1 and 3 mode. The weight loss was from 338 to 363 mg. The further results showed that this type of coating didn't have any resistance to wet abrasion. The biggest mass loss after 8 hours was fixed in Fe-Mn-Cr-Mo type of coatings in the first spraying mode. It was equal to 1062 mg/8h. That poor results were due to wet friction, the smallest hardness (462 HV 0.3) and pore inclusion (3.5%) in the coatings. Fe-Mn-Cr-Mo coatings don't have a good resistance to wet friction.

To the microstructure of these coatings tightly bounded lamellar structure with considerable porosity is characteristic. The spraying modes with low amperage formed bigger lamellar structure. It affects a significant weight loss in Miller test. The largest particles were removed from the surface in the first test hours and mass loss was the biggest, later the mass loss percentage became normal. The lowest mass loss of tested coatings was registered in Fe-Mn-Cr (22.61% Cr), it was only 320–369 mg/8h. Good wet friction resistance results were influenced by $\text{Cr}_{22.23}\text{Fe}_{0.77}\text{C}_6$ carbides formed in the coating which have good hardness. The similar weight loss (from 505 to 615 mg) was registered in Fe-Mn-

Cr-Mo-Ni and Fe-Mn-Cr coatings. The weight loss in these coatings is inversely proportioned to their hardness (494–604 HV 0.3). The quantity of pores (3.1–1.5 %) in the coatings negatively influenced the results of resistance to wet friction.

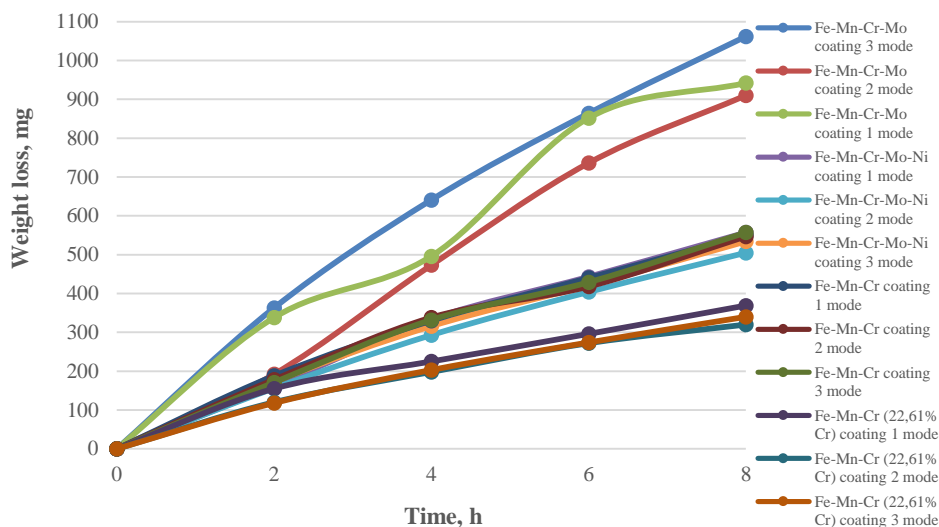


Fig. S10. The thermal arc sprayed coatings' resistance to wet friction

The sliding wear results showed that the obtained values of friction depend on porosity and carbide inclusions in the coatings. The experiment showed that the best quality of coatings' resistance to sliding friction using a hardened steel and a ceramic indenter were in Fe-Mn-Cr and Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings. Using Al_2O_3 indenter in Fe-Mn-Cr coatings, volume removed from the coating was equal to 0.0808 mm^3 , in Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) only 0.0565 mm^3 . In all cases of test, with exception of Fe-Mn-Cr-Mo coatings, the minimum volume removed was estimated in the coatings which were sprayed according to the second spraying mode, using 350 A spraying current.

General conclusions

Summarizing the results of the dissertation, following statements could be drawn:

1. In cooperation with the manufacturer of wire, four flux-cored wires of new chemical composition were created and analysed, suitable for spraying process and intended for strengthening or restauration of steel surfaces.

2. The particle size in spray torch depends on the spraying current. The low spraying current (320 A) form the large droplets, when the current increases, the droplets become smaller. The smallest melted droplets are produced when exposed to the 380 A current. The molten particle diameter reduced by 58 % in average.
3. The size of sprayed particle makes an influence on the coating's morphology. When changing the size of sprayed particles the coatings which meet the requirements of specific operational conditions may be obtained. At 20.8 μm average particle size the average thickness of lamella is 5 μm , diameter 200 μm . When the particle size reduces to 9.2 μm , thickness of lamella reduces to 2 μm and diameter becomes equal to 180 μm .
4. The quantity of chromium and carbon in the coatings determine their resistance to friction. The best resistance to dry, wet and sliding friction have Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) and Fe-Mn-Cr coatings, in which chromium carbides form. Under the conditions of dry friction the best resistance have Fe - Mn - Cr (22.61% Cr) (155 mg) and Fe-Mn-Cr (171 mg) type coatings. Under the conditions of wet friction Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings lost 320 mg of weight, while the Fe-Mn-Cr coatings lost 1.6 times more weight (505 mg). Under the conditions of sliding friction Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) type of coatings lost 1.4 times less volume than the surface of Fe-Mn-Cr coatings. The $\text{Cr}_{22.23}\text{Fe}_{0.77}\text{C}_6$ and Cr_7C_3 carbides formed in the coatings during the spraying influence even hardness and resistance to wet, dry and sliding friction in the coatings. It was substantiated, that Mn_7C_3 carbides in Fe-Mn-Cr-Mo-Ni type of coatings have better tribological properties in the dry friction than in wet friction.
5. The heterogeneity of coatings and formed $\text{Cr}_{22.23}\text{Fe}_{0.77}\text{C}_6$ carbides worsen corrosive resistance. The lowest electrochemical corrosive resistance was estimated in Fe-Mn-Cr (22.61% Cr) coatings, $E_{\text{cor}} = (-0.6295 \text{ V})$. It was found that the Fe-Mn-Cr-Mo-Ni $E_{\text{cor}} = (-0.4636 \text{ V})$ coatings have the best corrosive resistance.

Priedai¹

A priedas. Skaitinės adhezijos reikšmės

B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Justinas GARGASAS

ELEKTROLANKINIŲ PURŠKIMŲ
SUDAROMŲ METALINIŲ DANGŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (08T)

THE INVESTIGATION OF METALLIC
COATINGS MADE BY ARC SPRAY

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2015 12 14. 11,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius